

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Výběr a optimalizace leteckého profilu

The selection and optimization of an airfoil

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Vít Štorch

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: bez oboru

David Kohout

Praha 2016



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: **p. Davida KOHOUTA**

program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

obor: **bez oboru**

název česky: **Výběr a optimalizace leteckého profilu**

název anglicky: **The Selection and Optimization of an Airfoil**

Zásady pro vypracování:

- 1) Popište geometrické a aerodynamické parametry leteckého profilu a jejich vliv na dosahované výkony letounu. Dále popište několik optimalizačních algoritmů použitelných pro optimalizaci tvaru profilu a vyberte nejvhodnější pro sestavení optimalizačního programu.
- 2) Sestavte rozsáhlou databázi souřadnic profilů a vypočítejte pro ně programem XFOIL poláry v rozsahu Reynoldsových čísel obvyklých pro provoz větších modelů a ultralehkých letounů.
- 3) Popište sestavení cílové funkce pro optimalizaci s ohledem na obvyklé požadavky na profily. Proveďte výběr profilu z databáze, který dosahuje extrému cílové funkce na dané množině profilů.
- 4) Aplikujte zvolený optimalizační algoritmus na vybraný profil z databáze a ohodnoťte výsledky.

Rozsah průvodní zprávy: 25 stran

Rozsah grafických prací: grafy, schémata, 5 stran

Seznam doporučené literatury:

1) Zelinka, I.: *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009

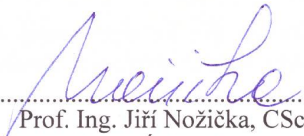
2) Brož, V.: *Aerodynamika nízkých rychlostí*. 3. vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1990

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vít Štorch

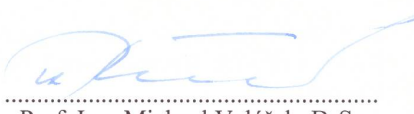
Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 25. 4. 2016

Datum odevzdání bakalářské práce: 26. 8. 2016


Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
Vedoucí Ú 12112




Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 25. 4. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou diplomovou práci zpracoval samostatně a souhlasím s tím, že její výsledky mohou být dále využity dle uvážení vedoucího této práce Ing. Víta Štorcha. V případě publikace si přeji být uveden jako spoluautor.

Datum..... Podpis.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Vítu Štorchovi za jeho trpělivost a obětavost při psaní této práce a za poskytnutí veškerých materiálů a rad.

Anotace

Jméno autora:	David Kohout
Název bakalářské práce:	Výběr a optimalizace leteckého profilu
Anglický název:	The selection and optimization of an airfoil
Rok:	2016
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	bez oboru
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termomechaniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Vít Štorch
Bibliografické údaje:	počet stran: 30 počet obrázků: 23 počet příloh: 1
Klíčová slova:	Letecký profil, multiparametrické vyhledávání, optimalizace profilu křídla, genetické algoritmy, XFOIL
Keywords:	Airfoil, multiparametric search, airfoil optimization, genetic algorithm, XFOIL
Anotace:	Bakalářská práce je zaměřená na výběr a optimalizaci leteckého profilu. Teoretická část se zabývá vlivem aerodynamických a geometrických parametrů na provoz leteckého profilu, rozdělení optimalizačních algoritmů a jejich srovnání. Praktická část je zaměřena na tvorbu databáze profilů a programu pro multiparametrické vyhledávání. Druhá polovina praktické části je věnována tvorbě genetického algoritmu
Abstract:	Main objective of this bachelor thesis is selection and optimization of the airfoil. The theoretical part deals with the influence of aerodynamic and geometric parameters on the operation of the airfoil, distribution of optimization algorithms and their comparison. The practical part is focused on preparation of profiles database and creation of program for multi-parametric search. The second half of the practical part is devoted to the development of genetic algorithm.

Seznam použitých symbolů a zkratek

znak	jednotka	název
A	[m ²]	Kolmá plocha profilu vzhledem ke směru proudění vzduchu
ACO		Ant colony optimalization
ARMA		Autoregressive–moving-average model
b	[%]	Délka tětiny profilu
C(x)	[%]	průhyb střední čáry profilu
c ₁ ,c ₂	[1]	Učící faktor
C _{max}	[%]	Maximální průhyb profilu
c _x	[1]	Koeficient odporu
c _{xmin}	[1]	Minimální hodnota odporu
c _y	[1]	Koeficient vztlaku
c _y /c _x	[1]	Klouzavost
C _y /C _{xmax}	[1]	Vážený průměr maximální klouzavosti profilu
(c _y /c _x) _{max}	[1]	Maximální hodnota klouzavosti
c _{yij}	[1]	Řídící body váhové funkce pro rozložení vztlaků
c _{ymax}	[1]	Maximální hodnota vztlaku
C _y _{max}	[1]	Vážený průměr maximálního vztlaku profilu
D	[1]	Definiční obor
DEPSO		Diferencial evolution & Particle swarm optimization
EPSO		Evolution pragraming & Particle swarm optimization
F	[N]	Výsledná aerodynamická síla
F _v	[1]	Výběrová funkce
f	[1]	Účelová funkce
f _{cy}	[1]	Váhová funkce pro optimální rozložení vztlaku
F _i ⁿ	[1]	Kriteriální funkce
f _m	[1]	Funkce průhybu střední čáry
f _{opt}	[1]	Optimalizovaná funkce
f _{Re}	[1]	Váhová funkce pro optimální rozložení Reynoldsových čísel
f _t	[1]	Tloušťková funkce profilu
F _x	[N]	Odporová síla
F _y	[N]	Vztlaková síla
GA		Genetic Algorithm
GAPSO		Genetic algorithm & Particle swarm optimization
gBest _{i,d}	[1]	Nejlepší nalezená pozice v populaci

HC		High climbing horolezecký algoritmus
k	[1]	Velikost Tabu listu
k_i	[1]	Korekční koeficienty ovlivňující citlivost na jednotlivé parametry
L		Náběžný bod
M	[Nm]	Klopivý moment
M_r	[1]	Prostor řešení
m_z	[1]	Koeficient klopného momentu
N	[1]	Množina sousedů řešení
N_g	[1]	Počet jedinců v generaci
$P(0)$	[1]	Počáteční generace
$pBest_{i,d}$	[1]	Nejlepší dosavadní pozice daného jedince
P_{camber}	[1]	Penalizační člen pro povolený průhyb střední čáry u odtokové hrany
PSO		Particle swarm optimization
PSO		Particle swarm optimization
$P_{thickness}$	[1]	Penalizační koeficient pro minimální tloušťku u odtokové hrany
q_∞	[m.s ⁻¹]	Rychlost proudu vzduchu
R	[1]	Množina reálných čísel
rand	[1]	Náhodné číslo v interval (0,1)
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
Re_{ij}	[1]	Řídící body váhové funkce pro Reynoldsova čísla
r_m	[%]	Poloměr náběžné hrany
S	[1]	Jedinci v populaci
S^*	[1]	Nejlepší řešení v počáteční populaci
S_0	[1]	Nejhorší řešení v populaci
SA		Simulované žíhání
SOMA		Self-Organizing Migrating Algorithm
T		Odtokový bod
t	[1]	Iterace
$T(x)$	[%]	Tloušťková funkce
T'	[-]	Rozptyl možných řešení
T_0	[°C]	Počáteční teplota
T_f	[°C]	Maximální teplota
TL		Tabu list seznam zakázaných operací
T_{max}	[%]	Maximální tloušťka
t_{max}	[1]	Maximální počet iterací algoritmu

TS		Tabu search
u_{∞}, v_{∞}	$[m.s^{-1}]$	Složky rychlosti proudu vzduchu
v	$[m.s^{-1}]$	Rychlost obtékání profilu křídla
$v_d(t)$	$[m.s^{-1}]$	Okamžitá rychlost jedince
$v_d(t+1)$	$[m.s^{-1}]$	Rychlost jedince v následujícím kroku
w	$[1]$	Váhová funkce
x^*	$[1]$	Globální minimum funkce $f(x)$
x, y	$[1]$	Souřadnice profilu
x_0	$[1]$	Počáteční řešení
x_c	$[\%]$	Poloha maximálního průhybu profilu od náběžné hrany
$x_{i,d}(t+1)$	$[m]$	Okamžitá pozice jedince
x_t	$[\%]$	Poloha maximální tloušťky profilu od náběžné hrany
α	$[\circ]$	Úhel náběhu
α_r	$[1]$	Redukční faktor teploty
γ	$[m^2.s^{-1}]$	Cirkulace
θ	$[1]$	Množina přípustných transformací
μ	$[Pa.s]$	Dynamická viskozita
ρ	$[kg.m^{-3}]$	Hustota
σ_j	$[m^2.s^{-1}]$	Intenzita zdroje
τ	$[\circ]$	Úhel odtokové hrany
ν	$[m^2.s^{-1}]$	Kinetická viskozita

Seznam obrázků a grafů

Obr. 2.1 Geometrické charakteristiky profilu křídla.....	2
Obr. 2.2 Aerodynamické síly působící na profil (HQ 3.0/14)	3
Obr. 2.3 Polára profilu a popis jednotlivých částí letu	4
Obr. 3.1 Xfoil - použití panelové metody (profil HQ 3.0/14) (vypracováno dle [10] str.2.....	5
Obr. 5.1 Schéma dělení optimalizačních úloh vypracováno dle [4].....	8
Obr. 5.2 Schéma rozdělení algoritmů pro globální optimalizaci vypracováno dle [4].....	9
Obr. 5.3 Pohyb částice ovlivněný jednotlivými tendencemi [4].....	13
Obr. 5.4 Jednotková úsečka pro výběr jedince vypracován o dle [4]	16
Obr. 5.5 Schéma jednobodového křížení [4]	16
Obr. 6.1 Struktura databáze profilů	18
Obr. 6.2 Váhové funkce pro Re čísla ve dvou režimech letu	19
Obr. 6.3 Křivka klouzavosti před a po aplikování váhové funkce	19
Obr. 6.4 Definice polohy penalizačního bodu	20
Obr. 6.5. Uživatelské rozhraní pro multiparametrické vyhledávání.....	21
Obr. 6.6 Vyhodnocení vyhledávání pro profil s vysokým $c_{y\max}$	22
Obr. 6.7 Vyhodnocení vyhledávání pro profil s vysokým $(c_y/c_x)_{\max}$	23
Obr. 6.8 Vyhodnocení vyhledávání pro reálný profil	24
Obr. 7.1 Rozložení profilu na tloušťkovou a průhybovou funkci a jejich modifikace.....	25
Obr. 7.2 Schéma genetického algoritmu.....	26
Obr. 7.3 Průběh účelové funkce v závislosti na iteracích optimalizace	27
Obr. 7.4 Maximální aerodynamické koeficienty v závislosti na iteracích optimalizace	27
Obr. 7.5 Porovnání původního a optimalizovaného profilu NACA 63012a	28
Obr. 7.6 Porovnání polár původního a optimalizovaného profilu NACA 63012a.....	28

Obsah

1	Úvod	1
2	Základní charakteristika křídla	2
2.1	Geometrie profilu křídla.....	2
2.2	Aerodynamické síly a moment.....	3
2.3	Polára profilu.....	4
3	XFOIL.....	5
3.1	Panelová metoda	5
4	Cíle optimalizace	6
4.1	Aerodynamické požadavky.....	6
4.2	Konstrukčně technologické požadavky.....	6
5	Optimalizace.....	7
5.1	Účelová funkce.....	7
5.2	Základní rozdělení optimalizace	8
5.3	Globální optimalizace	9
5.3.1	Slepý algoritmus	10
5.3.2	Horolezecký algoritmus	10
5.3.3	Tabu Search	11
5.3.4	Simulované žíhání.....	12
5.3.5	PSO	13
5.3.6	Genetické algoritmy.....	15
6	Multiparametrické vyhledávání profilů	18
6.1	Vytváření databáze profilů.....	18
6.2	Multiparametrické vyhledávání	18
6.2.1	Váhová funkce	19
6.2.2	Výběrová funkce.....	20
6.3	Uživatelské rozhraní.....	21
6.4	Vyhodnocení výsledků vyhledávání	22
6.4.1	Profil s největším maximálním vztlakem	22
6.4.2	Profil s největší maximální klouzavostí.....	23
6.4.3	Profil s nastavením optimálních parametrů	24
7	Optimalizace profilu pomocí GA.....	25

7.1	Nastavení optimalizačního algoritmu	25
7.2	Výsledky optimalizace	27
8	Závěr	29
	Literatura	30
	Příloha A.....	I

1 Úvod

Volba správného profilu křídla je součástí prvotního návrhu letadla. Správnou volbou můžeme zajistit dobrou stabilitu, ovladatelnost, maximální rychlost, spotřebu a mnoho dalších vlastností. Existuje dnes mnoho osvědčených profilů, které jsou často využívány, ale výběr, výpočet a porovnání jsou časově náročné. Zavedení nástroje, který disponuje databází vypočítaných leteckých profilů křídel, urychlí srovnání a výběr vhodného leteckého profilu křídla. Čas získaný při výběru může být věnován optimalizaci, která daný profil zdokonalí a přiblíží požadavkům kladených na profil.

Cílem práce je vytvoření programu pro rychlé vyhledávání leteckých profilů a jejich optimalizaci. V teoretické části jsou popsány aerodynamické a geometrické parametry křídla a dopad jejich změny na vlastnosti letu. Reálné požadavky kladené na letecký profil křídla jsou definovány parametry, které skládají výslednou výběrovou nebo účelovou funkci. Dále je zde popsán výpočet programu XFOIL pomocí panelové metody. Závěr teoretické části je věnován popisu optimalizačních metod a základních pojmů z optimalizace.

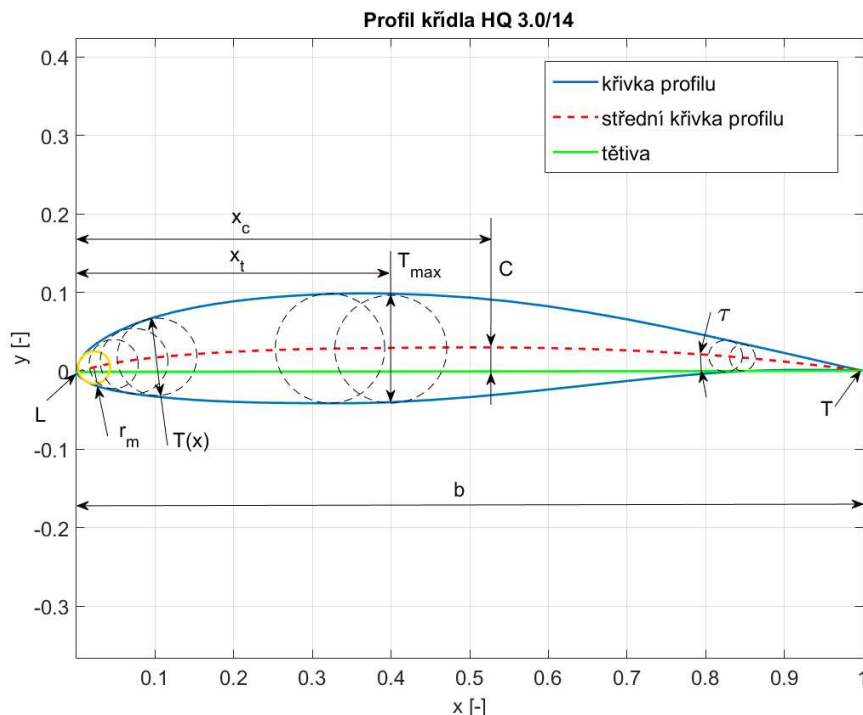
Praktická část je zaměřena na vytváření programu v prostředí MATLAB. Nejprve je popsána tvorba databáze, která umožňuje rychlé nalezení leteckých profilů křídel. Program vyhledávající v databázi je založen na multiparametrickém vyhledávání, které umožňuje hledání leteckých profilů s optimálním rozložením požadovaných parametrů.

Druhá polovina praktické části je věnována optimalizaci pomocí genetického algoritmu. Genetické algoritmy jsou jednou z nejpoužívanějších optimalizačních metod díky kombinaci stochastických metod, které systematicky prohledávají množinu řešení a deterministickému přístupu zaručujícímu částečnou náhodnost algoritmu. Genetický algoritmus je vytvořen v programu MATLAB a letecké profily jsou počítány v programu XFOIL.

2 Základní charakteristika křídla

2.1 Geometrie profilu křídla

Profil křídla získáme kolmým řezem k ploše křídla. Vzniklou křivku můžeme popsat následujícími parametry viz obr. 2.1.



Obr. 2.1 Geometrické charakteristiky profilu křídla

- Tětiva profilu – spojuje náběžný bod L a odtokový bod T. Délka tětivy b se nazývá hloubka profilu, uvádí se v procentech a jsou k ní vztaženy veškeré rozměry profilu.
- Střední čára – spojuje středy vepsaných kružnic do profilu a udává prohnutí profilu C . Důležitým parametrem profilu je maximální hodnota prohnutí c_{max} . Používá se jako jeden z hlavních parametrů, při vytváření nového profilu.
- Tloušťka profilu – vyjadřuje kolmou vzdálenost mezi střední křivkou a křivkou profilu. Průběh tloušťky profilu popisuje tloušťková funkce $T(x)$ a důležitým parametrem je její maximální hodnota T_{max} a vzdálenost od náběžné hrany x_t .
- Poloměr náběžné hrany – určuje zakřivení náběžné hrany
- Úhel odtokové hrany τ – ovlivňuje odtržení proudu vzduchu, které způsobuje vznik úplavu za profilem. Zmenšením oblasti úplavu je dosaženo snížení celkového odporu profilu. [1]

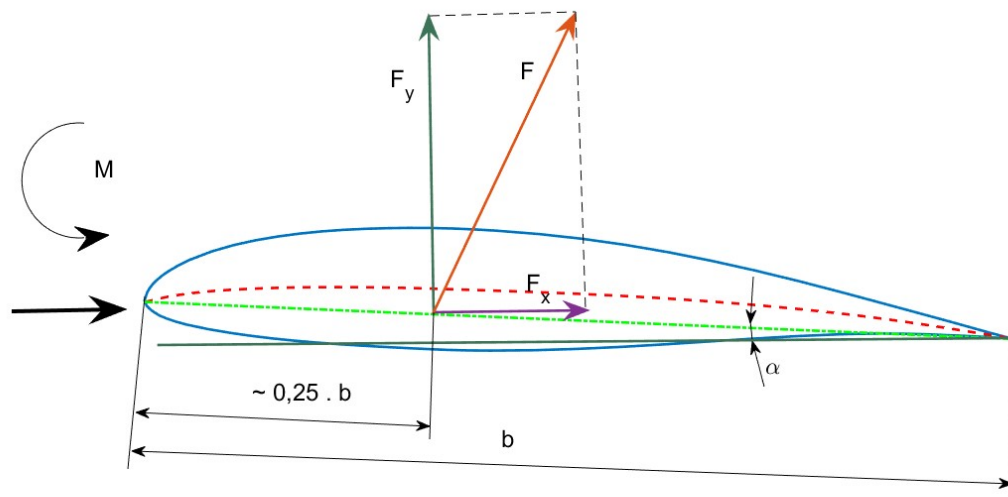
2.2 Aerodynamické síly a moment

Síla vzniká při obtékání tělesa proudem vzduchu. Dochází k nerovnoměrnému rozložení rychlosti po obvodu povrchu křídla, vyvolání rozdílných tlaků, které vytváří reakční síly. Symetrický profil s nulovým úhlem náběhu α má výslednici sil vodorovnou. Pokud profil není symetrický nebo je úhel náběhu jiný, výsledná síla se vychýlí od původní polohy. Výslednice sil se dělí do dvou složek popsány rovnicemi (1) pro silovou složku v ose x a (2) v ose y. Výsledná síla je popsána rovnicí (3). [2]

$$F_x = \frac{1}{2} c_x \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (1)$$

$$F_y = \frac{1}{2} c_y \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (2)$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (3)$$



Obr. 2.2 Aerodynamické síly působící na profil (HQ 3.0/14)

Síly jsou umístovány v $\frac{1}{4}$ třetiny, skutečné působíště se nachází v okolí tohoto bodu. Klopivý moment M pak vyjadřuje rozdíl polohy skutečného působíště a smluvně určené polohy. [1]

$$M = \frac{1}{2} m_z \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot b \quad (4)$$

Ve výše uvedených vztazích pro výpočet F_x , F_y , M se vyskytují součinitele vztlačku c_x , odporu c_y a součinitel klopivého momentu m_z . Na uvedené síly má především vliv rychlost letu a plocha profilu [1]

2.3 Polára profilu

Závislost součinitele odporu c_x a vzlaku c_y nazýváme polárou profilu. Ukazuje jak se profil bude chovat při různých letových režimech. Poláry jsou vždy počítány pro různá Reynoldsova čísla, která charakterizují různé režimy letu. Reynoldsovo číslo je vypočteno podle vztahu (5). Nejvíce je Reynoldsovo číslo konkrétního profilu křídla ovlivněno rychlostí letu v , ostatní parametry se mění minimálně. [2]

$$Re = \frac{\rho v b}{\mu} = \frac{v b}{\nu} \quad (5)$$

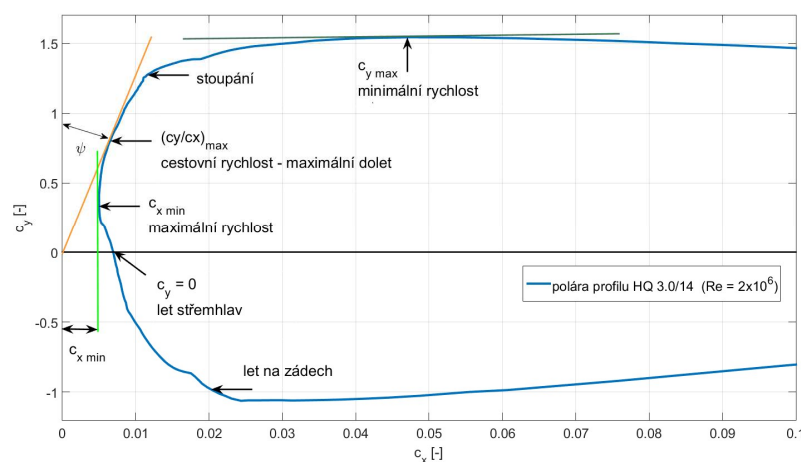
v = rychlost obtékání křídla [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

b = délka tělvy profilu [m]

ρ = hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

ν = kinematická viskozita vzduchu [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

μ = dynamická viskozita vzduchu [Pa.s]



Obr. 2.3 Polára profilu a popis jednotlivých částí letu

Nejdůležitějším parametrem je klouzavost, která je vyjádřena jako směrnice tečny k poláře vycházející z počátku souřadného systému. Lze ji také zapsat jako maximální poměr c_x a c_y . Určuje nejefektivnější cestovní rychlost a pádovou charakteristiku letadla, kdy po ztrátě tahu letadlo klesá. Udává poměr vzdálenosti, kterou letadlo urazilo proti výšce, o kterou kleslo. [3]

Mezi další důležité hodnoty patří minimální odpor profilu, který umožňuje dosáhnutí maximální rychlosti. Naopak z hodnoty maximálního vzlaku můžeme zjistit, kdy je letadlo přetaženo v kritické minimální rychlosti a začíná prudce padat. [3]

V záporné části součinitele vzlaku lze vidět, jak se letadlo chová při kolmém pádu a při otočení o 180° letadla na záda. [3]

3 XFOIL

Xfoil je program sloužící pro analýzu a výpočet parametrů samostatného 2D profilu křídla při podzvukovém proudění. První verze XFOIL 1.0 byla vyvinuta v roce 1986 Markem Drelou. Program je psaný v programovacím jazyce FORTRAN. Uživatelské rozhraní se skládá z příkazového řádku, kde pomocí jednoduchých příkazů jsou spočítány aerodynamické parametry profilu. Výpočty jsou založeny na dvourozměrné panelové metodě. [11]

3.1 Panelová metoda

Panelová metoda spočívá v rozdělení profilu křídla na jednotlivé segmenty tzv. vírové panely pospojované N uzly. Předpokládá se lineární průběh cirkulace po panelech a spojitý průběh v uzlech. Předpokladem pro výpočty v programu XFOIL je, že hodnota v uzlech spojující panely je rovna konstantě ψ_0 . Potom je získán pro lineární systém následující vztah (6). [10]

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot \gamma_j - \psi_0 = -u_{\infty} y_i + v_{\infty} x_i - \sum_{j=1}^{N+N_w-1} b_{ij} \sigma_j ; \quad 1 \leq i \leq N \quad (6)$$

x, y = souřadnice profilu [-]

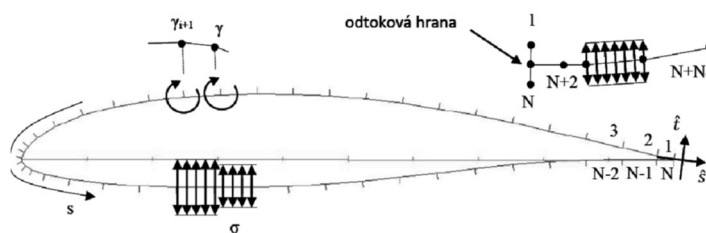
γ_i = cirkulace [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

u_{∞}, v_{∞} = složky rychlosti proudu vzduchu q_{∞} [m/s]

σ_j = intenzita zdroje [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Koeficienty matice a_{ij} a b_{ij} , jsou stanoveny z jednotkové rovnice proudění za předpokladu, že jsou známy souřadnice profilu x_i a y_i a počáteční body. Přidáním Kuttové podmínky získáme lineární systém $(N+1) \times (N+1)$ pro N hodnot uzlů γ_i . Na odtokové hraně pro uzly $i = 1$ a $i = N$ se rovnice shodují. Rovnice $i = N$ se nahradí extrapolací myšleného γ k odtokové hraně. Rovnice je zapsána ve tvaru (7). [10]

$$(\gamma_s - 2\gamma_s + \gamma_1) - (\gamma_{N-2} - 2\gamma_{N-1} + \gamma_N) = 0 \quad (7)$$



Obr. 3.1 Xfoil - použití panelové metody (profil HQ 3.0/14) (vypracováno dle [10] str.2

4 Cíle optimalizace

Nejprve je nutné stanovení nejdůležitějších parametrů, které charakterizují požadavky pro dané křídlo. Pokud při optimalizaci není správně nastavená účelová funkce, výsledky většinou nevedou k použitelnému řešení. Požadavky se mohou rozdělit na aerodynamické a konstrukčně technologické. [12]

4.1 Aerodynamické požadavky

Nejčastěji používaný člen pro optimalizační funkci je klouzavost, což je poměr c_y/c_x , kde při konstantním vztlaku je snaha o snižování celkového odporu profilu. Při více režimech letu pro zadaný profil je účelová funkce (8) rozšířena o další členy. Klouzavosti při jednotlivých režimech letu jsou násobeny váhovou funkcí w , která zohledňuje důležitost jednotlivých členů.[14] Zvýšením klouzavosti se snižuje spotřeba paliva a zvyšuje dolet letadla. [12]

$$F_v = w_1 \cdot \left(\frac{c_y}{c_x} \right)_1 + w_2 \cdot \left(\frac{c_y}{c_x} \right)_2 \dots + w_n \cdot \left(\frac{c_y}{c_x} \right)_n \quad (8)$$

Dalším parametrem vybraným pro účelovou funkci je maximální vztlak $c_{y_{\max}}$, který ovlivňuje velikost přistávací rychlosti. Zmenšením celkového odporu c_{D0} je dosaženo zvýšení celkového výkonu letadla. Pro snížení zatížení křídla krouticím momentem a zmenšení potřebné síly na vodorovné ocasní plochy je snaha o dosažení co nejmenšího koeficientu klopivého momentu c_m . [12]

4.2 Konstrukčně technologické požadavky

Do této skupiny spadají požadavky, kladené na profil při výrobě letounu. Profil by měl být co nejlepší z hlediska aerodynamických parametrů, ale také i po stránce vyrobitelnosti. Podmínky vyrobitelnosti profilu křídla jsou do účelové funkce zakomponovány pomocí penalizačních koeficientů. Parametrem je například maximální nebo minimální tloušťka ovlivňující jak aerodynamické vlastnosti, tak i pevnost celého křídla. Pro technologii je důležitá vyrobitelnost odtokové hrany, kde je určena minimální vyrobitelná tloušťka odtokové hrany.[12]

5 Optimalizace

Optimalizační algoritmy hledají nejlepší možné řešení. Úlohy optimalizace jsou převedeny z praxe do matematické funkce, která charakterizuje daný problém. Optimalizační algoritmy prohledávají různými způsoby definiční obory funkcí a snaží se najít její minimální nebo maximální hodnoty při optimální numerické kombinaci jejích argumentů. [4]

Při optimalizaci platí určitá omezení, která jsou dána limity výpočetní techniky, proto je důležité snažit se optimalizační funkce co nejvíce zjednodušovat. Fyzikální omezení v rámci výpočetní techniky definuje Bremermannova limita určující maximální teoretickou hodnotu $1,35 \cdot 10^{50}$ zpracovaných bitů za sekundu kilogramem hmoty. Cesta jak v dnešní době urychlit vědecké výpočty je formou paralelizace jednotlivých operací na jednotlivá jádra procesoru počítače. [4]

5.1 Účelová funkce

Účelová funkce popisující daný optimalizační problém se nazývá také cenová nebo hodnotící funkce, protože slouží k porovnání a ohodnocení jednotlivých výsledků optimalizace. Při řešení většiny optimalizačních úloh se hledá globální extrém. Výpočet extrému je formulován jako minimalizační úloha, kde se hledá globální minimum zadané funkce $f(x)$. Pro nalezení maxima je pouze vyhledáno minimum funkce $g(x) = -f(x)$. [4]

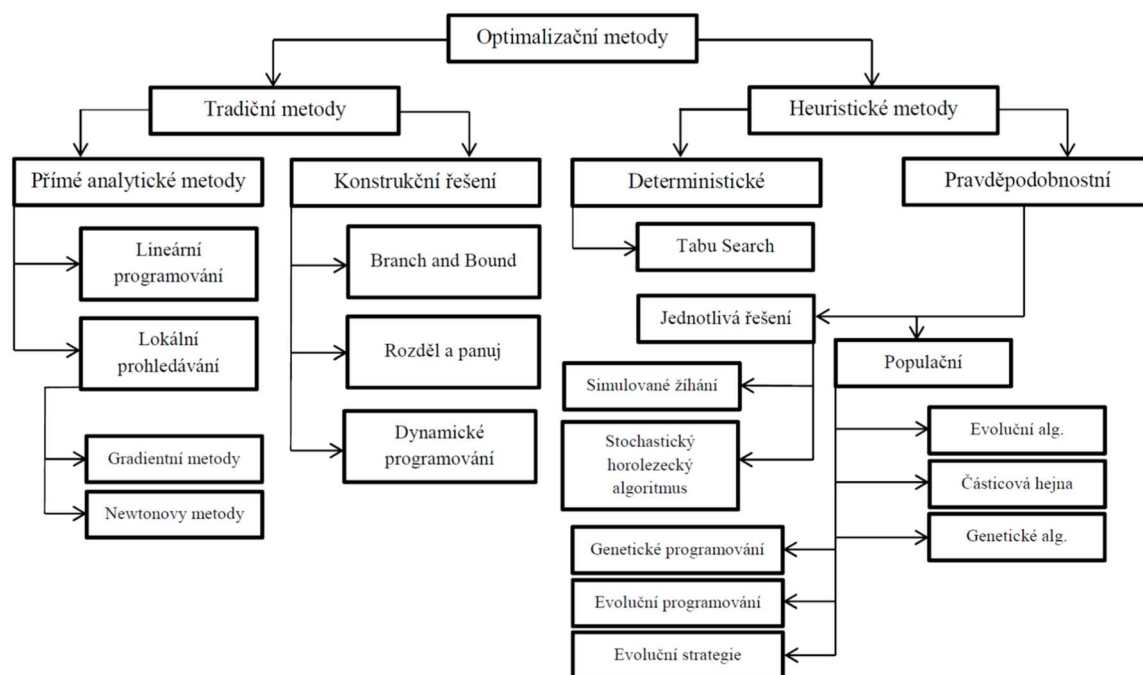
Nalezení globálního minima $f(x)$ na definičním oboru $D \rightarrow R, D \subseteq R^n$, spočívá v nalezení bodu $x^* \in D$. Platí, že $f(x^*) \leq f(x)$ pro $\forall x \in D$, kde bod x^* nazýváme globálním minimem funkce $f(x)$. [5] Velikost prohledávaného prostoru je dána n počtem argumentů x funkce $f(x)$, kde dostáváme $n+1$ rozměrný prostor. [4]

$$f(x) = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \quad (9)$$

Sestavení účelové funkce není přesně definováno, ale existuje mnoho různých přístupů k jejímu vytvoření. Jednou z metod je odhad parametrů pomocí tzv. ARMA modelu. Princip spočívá ve srovnávání výstupních hodnot parametrů optimalizační funkce s reálným systémem. Rozdíl dat na výstupu by měl být co nejmenší. Další metody jsou inverzní fraktální problém, prediktivní řízení a mnoho dalších. Členy účelové funkce volíme podle expertní analýzy zadaného optimalizačního problému. [4]

5.2 Základní rozdělení optimalizace

Optimalizaci můžeme dělit podle různých přístupů k řešení úlohy. Na obr. 5.1 je uvedeno dělení na dvě základní části, tradiční metody a heuristické metody. Tradičními metodami jsme schopni exaktně řešit optimalizační problém který je popsán lineární funkcí. Jsou kladeny podmínky na minimální prohledávaný prostor možných řešení a na spojitost funkce. Zadání je v analytickém tvaru. Nejznámější a nejúspěšnější tradiční metodou řešení optimalizačních úloh je simplexová metoda, která je řazena do lineárního programování. [4]

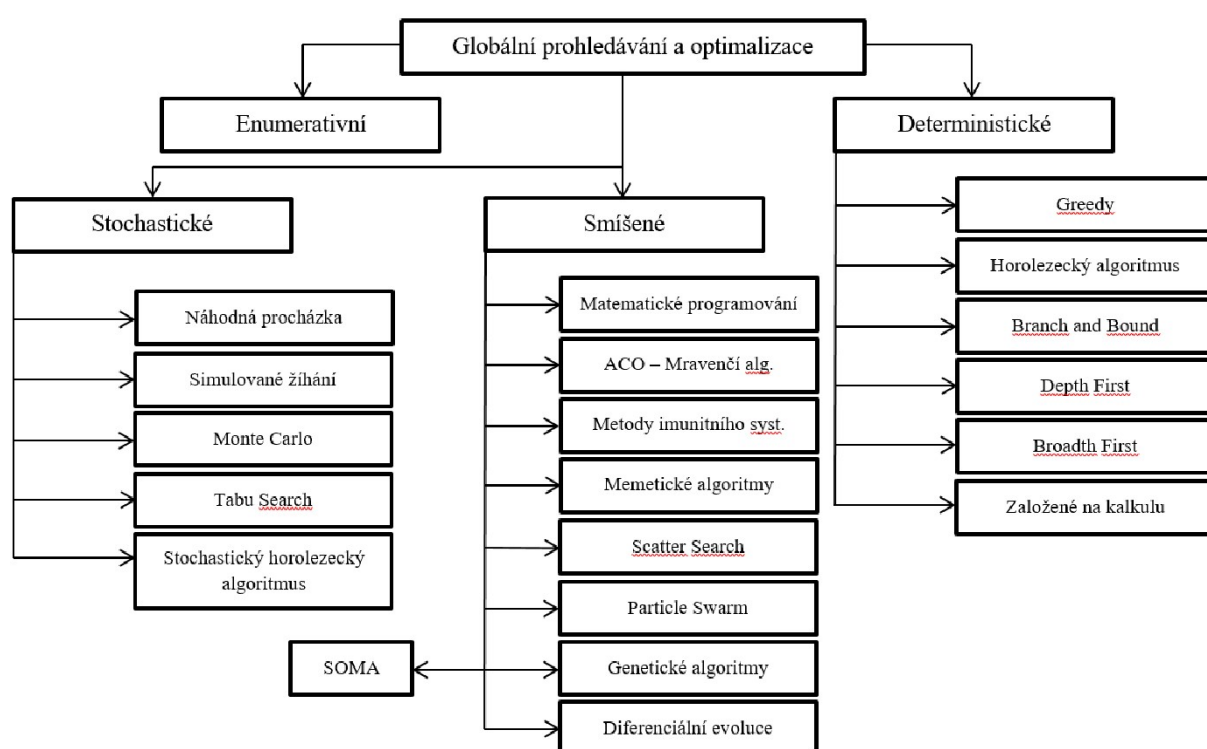


Obr. 5.1 Schéma dělení optimalizačních úloh vypracováno dle [4]

Druhou skupinou jsou heuristické algoritmy hledající přibližné řešení pomocí náhodných kroků. Dělí se na deterministické a pravděpodobnostní neboli stochastické metody. Deterministické algoritmy jsou předvídatelné a každý jejich krok je matematicky zadaný. Dnes však přibývají komplikovanější problémy s požadavkem na přesné řešení a proto většina technických problémů je řešena pravděpodobnostní metodou. Pravděpodobnostní metody jsou založeny na náhodných krocích výpočetního algoritmu. Při každém dalším cyklu je získáno nové řešení, které se může pomocí vhodně zvoleného algoritmu postupně zpřesňovat a zdokonalovat. [4]

5.3 Globální optimalizace

V technické praxi je většina úloh založena na globální optimalizaci, která je zadána nelineární funkcí s více extrémy. Rozdělení jednotlivých druhů globální optimalizace je podle jednotlivých způsobů prohledávání definičního oboru funkce, viz obrázek 5.2. Nejméně využívané jsou deterministické algoritmy. Pro jejich řešení je nutná linearita účelové funkce a malý prohledávaný prostor. Dalším druhem algoritmů jsou enumerativní metody, které postupně procházejí všechny body množiny funkce a počítají jednotlivé hodnoty optimalizační funkce. Nevýhodou těchto metod je velká časová náročnost, která omezuje možnost aplikace pouze na funkce s minimem parametrů. [4]



Obr. 5.2 Schéma rozdělení algoritmů pro globální optimalizaci vypracováno dle [4]

Nejvíce využívaným typem algoritmů jsou stochastické metody nebo smíšené úlohy, které kombinují jak stochastický tak deterministický přístup. Algoritmy jsou založeny na částečně náhodném generování nových řešení. V praxi je lze snadno aplikovat i na složitější problémy, které pomocí numerických výpočtů a počítačové techniky lze vyřešit. Nevýhodou je nepřesnost řešení, kterou nám nejvíce ovlivňuje nevhodná volba optimalizační funkce a okrajových podmínek. [4]

5.3.1 Slepý algoritmus

Nejjednodušší druh stochastického algoritmu, nazývá se také random walk neboli náhodná procházka. Základem je náhodné generování řešení v jednotlivých cyklech. Každý krok je ohodnocen pomocí účelové funkce. Pokud je řešení lepší než v předešlém cyklu, je uloženo do paměti. Počáteční řešení se ukládá automaticky. [4]

Náhodnost generových řešení má výhodu, že algoritmus nemůže uváznout v lokálním extrému. Nevýhodou je časová náročnost, kde k výslednému řešení dojde v několika krocích nebo také čase blížícího se k nekonečnu. Proto se v praxi využívají spíše algoritmy se systematickými technikami prohledávání definičního oboru optimalizační funkce. [4]

Pseudokód algoritmu obsahuje pouze vstupní proměnné - účelovou funkci f a iterace, která definuje maximální počet cyklů algoritmu, po kterém je program zastaven. [4]

```
for  $i < \text{iterace}$  do  
  begin  
     $\text{arg} = \text{rand}_i$  % náhodně vygenerované číslo ze zadaného intervalu  
     $\text{vhodnost} = f$  % ohodnocení předchozího výsledku (arg)  
    if  $\text{vhodnost} < \text{vhodnost}_0$  % porovnání aktuálního a předchozího řešení  
      then begin  
         $\text{vhodnost}_0 = \text{vhodnost}$  % uložení velikosti hodnotící funkce  
         $\text{arg}_{\text{best}} = \text{arg}$  % uložení nejlepšího řešení  
      end  
    end  
end [4]
```

5.3.2 Horolezecký algoritmus

Horolezecký algoritmus oproti slepému algoritmu nevyužívá pravděpodobnostní výpočet založený pouze na náhodě. Nejprve je kolem zadaného bodu vygenerována množina řešení. V dalším kroku je vybráno nejlepší řešení, které je použito v následujícím kroku algoritmu jako střed množiny nových řešení. V průběhu jednotlivých výpočtů se ukládají do paměti nejlepší hodnoty účelové funkce. Po dokončení definovaného n -počtu cyklů je vyhodnoceno nejlepší řešení. [4]

Prohledávání optimalizované funkce probíhá ve směru růstu funkce, proto horolezecké algoritmy řadíme mezi gradientní metody. Výhodou je rychlé nalezení extrému funkce systematickým prohledáváním definičního oboru. Podmínkou pro ukončení algoritmu je dosažení maximálního povoleného počtu iterací nebo dosažení extrému funkce. Nevýhodou je snadné uvíznutí v lokálním extrému, proto jsou využívány pro dokončení optimalizační úlohy. [4]

Další variantou horolezeckého algoritmu je horolezecký algoritmus s učením. Využívá místo náhodného generování řešení kolem středu pravděpodobnostní vektor, který posouvá

množinu řešení k nejlepšímu řešení a urychluje celý výpočet. Jednoduchý horolezecký algoritmus HC je zapsán obecně pomocí funkce (10), která nám popisuje vstupní parametry algoritmu. [4]

$$HC = (M_r, x_0, N, f, t_{\max}) \quad (10)$$

M_r = prostor řešení

x_0 = počáteční řešení

N = množina sousedů řešení $x \in M$

f = účelová funkce

t_{\max} = maximální počet iterací algoritmu

```

x* := x0t;
while  $t \leq t_{\max}$  do
    begin generuj  $N(\mathbf{x}_{0t}, \sigma)$ 
        najdi  $\mathbf{x}_{loc} \in N(\mathbf{x}_{0t}, \sigma)$  tak, že  $f(\mathbf{x}_{loc}) \geq f(\mathbf{x})$ , pro každé  $\mathbf{x} \in N(\mathbf{x}_{0t}, \sigma)$ 
         $f(x_{loc}) := \max_{x \in N(x_{0t}, \sigma)} f(x)$ 
        if  $f(\mathbf{x}_{loc}) \geq f(\mathbf{x})$ 
            then x* :=  $\mathbf{x}_{loc}$ 
             $t := t+1$ 
             $\mathbf{x}_{0t} := \mathbf{x}_{loc}$ ;
        end [4]

```

5.3.3 Tabu Search

Tabu Search je stochastická metoda využívající principy horolezeckého algoritmu, který vytvoří množiny řešení kolem nejlepšího výsledku z předešlého kroku. Tabu Search řeší problém s opakováním a zacyklením výpočtů pomocí krátkodobé paměti, kde jsou předešlá řešení uložena a zakázána pro nadcházející kroky. Seznam zakázaných řešení se nazývá tzv. Tabu list a je omezen maximální kapacitou, kde při překročení limitu jsou postupně stará řešení odstraněna novými [7]

Efektivní řešení optimalizačních úloh ovlivňuje správná volba velikosti Tabu listu, kde při zvolení malé paměti dochází po pár krocích k zacyklení. Maximální rozsah nesmí být větší než celkový počet cyklů, protože by mohlo dojít k vynechání úseků, vedoucích ke globálnímu extrému. Algoritmus je ukončen po určitém počtu iterací, kde účelová funkce nedosáhla požadované změny. Tabu Search TS lze zapsat pomocí funkce (11), kde parametry M_r, x_0, f, t_{\max} jsou společné s horolezeckým algoritmem. [4]

$$TS = (M_r, x_0, \Theta, f, t_{\max}, TL, k) \quad (11)$$

Θ = množina přípustných transformací generující množinu sousedních řešení

TL = seznam zakázaných operací (Tabu list)

k = velikost TL

```

x* := x0t;
fmax := f(x0t);
TL := ();
while t ≤ tmax do
  begin xloc := x0t; floc := f(x0t);
    for ∀ϑ ∈ Θ do
      begin y := ϑ(x0t);
        if (f(y) > floc) and ((ϑ ∉ TL) or (f(y) > fmax))
          then begin xloc := y floc := f(y) ϑloc := ϑ
        end
      end
    if floc > fmax
      then begin fmax := floc x* := xloc;
    end
    if |TL| < k
      then TL := TL + (ϑloc-1)
      else TL := TL - (ϑ1) + (ϑloc-1);
    t := t + 1;
    x0t := xloc; [4]
  end

```

5.3.4 Simulované žíhání

Stochastický algoritmus simulovaného žíhání je založen na fyzikálním principu žíhání. Pokud je kov ohřát na vysokou teplotu, rozmístění částic bude náhodné. Následně pomalým ochlazováním je docíleno pravidelně uspořádané krystalové mřížky a snížení interakční energie částic. Algoritmus simulovaného žíhání *SA* je zapsán pomocí funkce (12). [4]

$$SA = (M_r, x_0, N, f, T_0, T_f, \alpha_r, n_T) \quad (12)$$

```

for i := 1 to nT do
  begin náhodně výběr x z množiny sousedů N(x0) řešení x0;
    Δf := f(x) - f(x0);
    if Δf < 0
      then begin x0 := x
        if f(x) < f(x*)
          then x* := x
        end
      else begin náhodně výběr r z rovnoměrného
        rozdělení na interval (0,1);
        if r < e-Δf/T
          then x0 := x
        end
      end
    end [4]
  end

```


Aplikace metody simulovaného žíhání spočívá v zavedení počáteční teploty T_0 , která značí rozptyl první množiny řešení. Následně pomalu klesá hodnota T_0 pomocí redukčního faktoru teploty α_r , který zmenšuje rozptyl možných řešení $T' = \alpha_r \cdot T_0$, kde α se volí v interval mezi 0,8 a 0,99. Pomocí vhodně zvoleného ochlazování jsou přeskakovány lokální extrémy a algoritmus postupuje konečným počtem cyklů ke globálnímu minimu. Podmínka ukončení algoritmu je dosažení minimální teploty T_f . [4]

5.3.5 PSO

Algoritmus PSO neboli particle swarm optimization je metoda napodobující chování hejn zvířat např. ptáků, ryb nebo včel. Množina částic prohledává zadanou účelovou funkci, pomocí náhodně generovaných řešení. Hlavním parametrem je tzv. rychlost, kterou vypočteme podle rovnice (13), dále určíme polohu částice ze vztahu (14). [4]

$$v_d(t+1) = v_d(t) + c_1 \cdot rand \cdot (pBest_{i,d} - x_{i,d}(t)) + c_2 \cdot rand \cdot (gBest_d - x_{i,d}(t)) \quad (13)$$

$$x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + v_d(t+1) \quad (14)$$

$v_d(t+1)$ = rychlost jedince v následujícím kroku [$m \cdot s^{-1}$]

$v_d(t)$ = rychlost jedince v tomto kroku [$m \cdot s^{-1}$]

$x_{i,d}(t+1)$ = pozice jedince v následujícím kroku [m]

$x_{i,d}(t)$ = momentální pozice jedince [m]

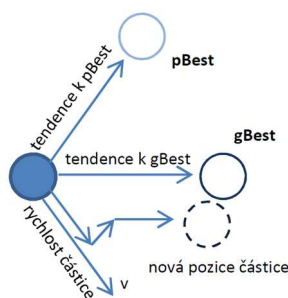
$pBest_{i,d}$ = je nejlepší dosavadní pozice daného jedince [-]

$gBest_{i,d}$ = je nejlepší nalezená pozice v populaci [-]

$rand$ = náhodné číslo v interval (0,1) [-]

c_1, c_2 = učicí faktor [-]

Částice procházejí definičním oborem účelové funkce a jejich směr posuvu je ovlivněn nejlepší hodnotou jedince na účelové funkci $pBest$ a zároveň nejvyšší nalezenou hodnotou účelové funkce v celém hejnu $gBest$. Výsledná trajektorie je zobrazena na obr. 4.3, kde jde vidět složení jednotlivých vektorů, kterými je získána výsledná poloha částice. [4]



Obr. 5.3 Pohyb částice ovlivněný jednotlivými tendencemi [4]

Dalšími parametry určující průběh algoritmu jsou dva učící faktory c_1 a c_2 , kde první směřuje pohyb částice k předchozímu nejlepšímu řešení daného jedince a druhý se snaží směřovat k nejlepšímu řešení v hejnu. Volba parametrů c je nejčastěji v intervalu $(0,4)$. Náhodnost celého algoritmu zajišťuje vynásobení členů c_1 a c_2 náhodným číslem rand v intervalu $(0,1)$, zajišťující náhodnost jednotlivých kroků a snížení rizika uváznutí v lokálním extrému. [4]

Propojenost jednotlivých členů hejna je rozdělena na globální a lokální. Globální propojení sousedů znamená, že všechny částice jsou propojeny. Lokální sousedstvím je tzv. Kruhová topologie, kde je částice přitahována pouze k dvěma sousedům nebo centralizovaná topologie, u které veškeré informace putují k hlavnímu jedinci. Další variantou je von Neumanovská topologie, která z předešlých topologií vykazuje nejlepší výsledky. S rostoucím počtem jedinců se zkracuje doba potřebná k dosažení globálního optima, ale narůstá riziko uváznutí v lokálním extrému. Naopak u menšího počtu jedinců je nalezení globálního extrému jisté, ale zvyšuje se časová náročnost výpočtu. [8]

Pro dosažení globálního optima je nutné správné nastavení počátečních podmínek. Důležité je omezení maximální rychlosti, kde při vyšších rychlostech může dojít k přeskočení globálního extrému. Dále je nutné zvolit počet částic, které budou zadaný definiční obor účelové funkce prohledávat. Určit vhodnou topologii, kterou se bude roj řídit. Počet částic se volí podle dimenze účelové funkce, kde počet částic je roven desetinásobku dimenze. Následuje volba učících faktorů, které ovlivňují velikost posuvu k nejlepším řešením, $p\text{Best}$, $g\text{Best}$. Posledním parametrem je setrvačnost, kterou je násobena předchozí rychlost jedince, kde pro setrvačnost < 1 se snižuje rychlost jedince a zvětšuje se pravděpodobnost nalezení lokálních extrémů. [4]

Algoritmus PSO je použit v mnoha modifikacích, které umožňují efektivnější aplikaci při specifických zadáních optimalizačních úloh. Hybridní PSO kombinuje prvky roje částic a evolučních technik, kde je do algoritmu zakomponována selekce, mutace a křížení. Přidáním evoluce je docíleno vyšší rozmanitosti populace. Výsledkem kombinací algoritmů PSO a genetických algoritmů tzv. GAPSO, evolučního programování tzv. EPSO, diferenciální evoluce tzv. DEPSO. Další skupinou jsou adaptivní PSO algoritmy, které využívají dalších paralelní PSO k vypočtení optimální velikosti populace, počtu sousedů a dalších parametrů. Protože složitost optimalizačních problémů a požadavky na přesnost řešení se neustále zvyšují, vytváří se mnoho pozměněných PSO algoritmů. Zde je uvedeno několik dalších druhů: PSO s pasivním shromažďováním, Rozptýlené PSO, Gaussovo PSO a další. [8]

Základní pseudokód PSO algoritmu lze zapsat následovně, v algoritmu není uvedeno omezení při překročení maximální rychlosti a definičního oboru funkce. [4]

iterace = maximální počet iterací

částice = počet částic p_i

```
for j=< počet částic do  
  begin  
    vypočítej rychlost částice podle (10)  
    uprav pozici částici podle (11)  
    vhodnost =  $f(p_i)$   
    if vhodnost < pBest  
      then begin  
        pBest = vhodnost  
      end  
    if pBest < gBest  
      then begin  
        gBest = pBest  
      end  
    end  
end [4]
```

5.3.6 Genetické algoritmy

Genetické algoritmy využívají heuristický postup, aplikují metody Darwinovy evoluční teorie. Genetické algoritmy se řadí do skupiny Evolučních algoritmů, kterou tvoří: Genetické algoritmy, Genetické programování, Evoluční strategie, Evoluční programování. Všechny evoluční algoritmy se skládají z podobných částí inspirovaných genetikou: křížení, mutace, selekce a dědičnost.

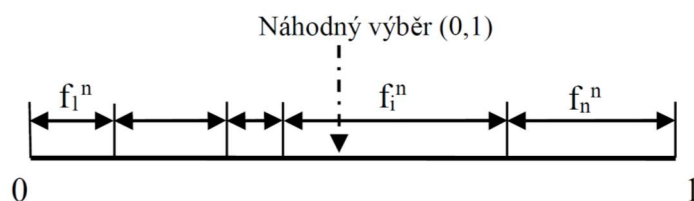
Princip genetických algoritmů spočívá v předávání informací dalším generacím pomocí genů. Geny jsou stočeny do záhybů a vytváří chromozómy, kde celková genetická výbava jedince se nazývá tzv. genotyp. [5] Pro různé aplikace je použito jiné vyjádření genů, nejčastěji je využíváno binární kódování např.: „0110101“. Pokud je problém komplikovanější a není možné převedení do binárního kódu, používají se celá, reálná čísla, kde vlivem zvětšování přesnosti řešení dochází k prodlužování řetězce. Další způsob je permutační zakódování, kde jednotlivým prvkům přiřadíme čísla, která složením těchto částí dohromady vytváří celky např.: „27895“. Posledním druhem kódování je tzv. stromová struktura.[4]

Prvním krokem je náhodné vygenerování počáteční generace, tento krok se nazývá inicializace. Z první generace jsou vybráni nejvhodnější rodiče a kombinací jejich chromozómů je získán nový jedinec. Výběr neboli selekce je provedena srovnáním jedinců

z celé generace pomocí kritériální funkce tzv. fitness function f_i^n , která je vyjádřena ve tvaru (15) pro i . jedince z populace n jedinců. [5]

$$f_i^n = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (15)$$

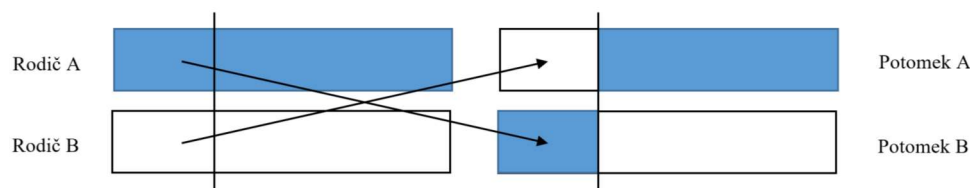
Následný výběr pak probíhá podle obr.:4.4, kde rozdělíme jednotkovou úsečku podle hodnot kritériální funkce z rovnice (15). Poté náhodným vygenerováním čísla v intervalu (0,1) získáme výslednou polohu jedince, který bude v další generaci rodičem. [5]



Obr. 5.4 Jednotková úsečka pro výběr jedince vypracován o dle [4]

Nevýhodou rozdělení jednotkové úsečky je možné převládnutí jednoho jedince nad většinou intervalu, proto se v určitých případech využívá pořadová selekce. Dojde k seřazení od nejhoršího k nejlepšímu jedinci a přiřazení čísla 1 - n . Dalším proces, který ovlivňuje chod algoritmu je elitizmus, kde nejlepší jedinec je umístěn rovnou do následující generace a nemůže tak dojít ke zhoršení výsledků.[4]

V následujícím kroku dojde ke zkřížení genotypu dvou jedinců a vytvoření dvou nových odlišných členů nové populace. Křížení probíhá podle obrázku 5.5. Nejprve náhodným určením pozice chromozomů, oddělující řetězec na jednotlivé části a následným složením úseku chromozomu prvního a druhého rodiče je získána nová generace.



Obr. 5.5 Schéma jednobodového křížení [4]

Dodržení náhodnosti celého procesu pomáhá mutace, která v malém měřítku pozměňuje hodnoty jednotlivých genů. Mutací můžeme nalézt lepší jedince, kteří zlepšují celou generaci a tím i rychlejší konvergenci algoritmu k lepšímu řešení. [5]

Zmutování jedinci jsou opět vyselektováni pomocí kritériální funkce a cyklus se znovu opakuje. Algoritmus se zastaví, pokud je dosaženo požadovaného výsledku, maximálního

počtu iterací nebo dojde k postupnému zhoršování výsledku. Důležité je stanovení vývojové strategie, která určuje prolínání generací. Generační strategie umožňuje pokračování pouze mladé generace. Druhou možností je postupná strategie, kde rodiče přežívají se svými potomky. [6]

Následující pseudokód popisuje základní strukturu GA. Nastavujeme maximální počet iterací t_{\max} , počet jedinců v generaci N_g a účelovou funkci f . Optimalizace je nastavena jako maximalizační úloha, hledáme maximum účelové funkce.

Generuj počáteční populace $P(0) := \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, $S_i \in \{0,1\}^n$

Vypočti vhodnost jedinců populace $P(0) := \{f(S_1), f(S_2), \dots, f(S_N)\}$

Najdi $S^* \in P(0)$ tak, že $f(S^*) \geq f(S)$, $S \in P(0)$ % S^* je nejlepší řešení v $P(0)$

$t := 0$

while $t \leq t_{\max}$ **do**

begin $\{P_1, P_2\} := \Theta(P(t))$; % výběr rodičů

$O := \Omega(P_1, P_2)$; % vygenerování potomka operací křížení

$O := \Omega_m(O, p_m)$; % mutace

 Najdi $S_0 \in P(t)$ tak, že $f(S_0) \geq f(S)$, $\forall S \in P(t)$; % S_0 nejhorší řešení v $P(t)$

$S_0 := O$ % nahrazení nejhoršího řešení potomkem

if $f(O) \geq f(S^*)$ **then** $S^* := O$; % aktualizace nejlepšího řešení

$t := t + 1$

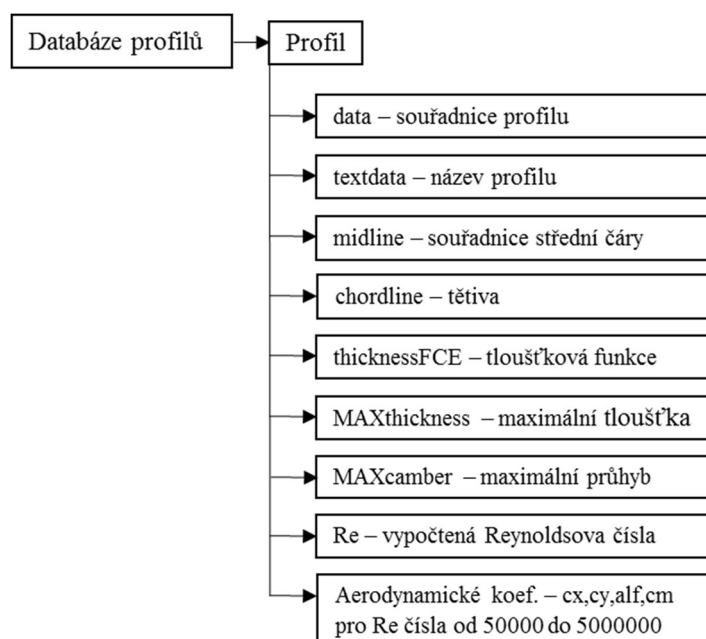
end [5]

V praxi se genetické algoritmy využívají v mnoha aplikacích, nejvíce je využívají podniky na plánování, logistiku a optimalizaci výroby. Největší výhodou GA je možnost sledovat a řídit celkový chod algoritmu, kde je vidět, zda dosahuje zadaných okrajových podmínek. Pokud jedinec nalezne lepší řešení v následující generaci, dojde k jeho zdokonalení. Výsledné řešení je často optimem mnoha parametrů, proto můžeme zpětně vybírat z více možných řešení, které nejlépe vystihují požadované parametry. Využití nalezneme i v leteckém průmyslu, kde od pevnostních analýz až po aerodynamický výpočet celého letadla je využívána optimalizace pomocí GA. Dále jsou GA využívány při optimalizacích složitých matematických modelů, řízení dopravy a mnoha dalších aplikacích. [9]

6 Multiparametrické vyhledávání profilů

6.1 Vytváření databáze profilů

Databáze je vytvořena v programu MATLAB pomocí strukturovaného pole. Souřadnice 1523 profilů byly nahrány z databáze University of Illinois Urbana-Champaign. První část databáze obsahuje geometrické parametry profilu, kde byla dopočtena střední čára profilu, tětíva, tloušťková funkce, maximální tloušťka a průhyb pomocí skriptu **load_GEO.m**.



Obr. 6.1 Struktura databáze profilů

V druhé části databáze byly vypočteny pro jednotlivé profily křidel aerodynamické koeficienty c_x , c_y , c_m v programu XFOIL při úhlu náběhu α od -25° do 25° a Reynoldsova čísla od 50,000 do 5000000. Výpočty v programu XFOIL byly automatizovány pomocí MATLABu, kde byl vytvořen skript **load_polary.m**. Výsledná podoba databáze je zobrazena na obrázku 6.1.

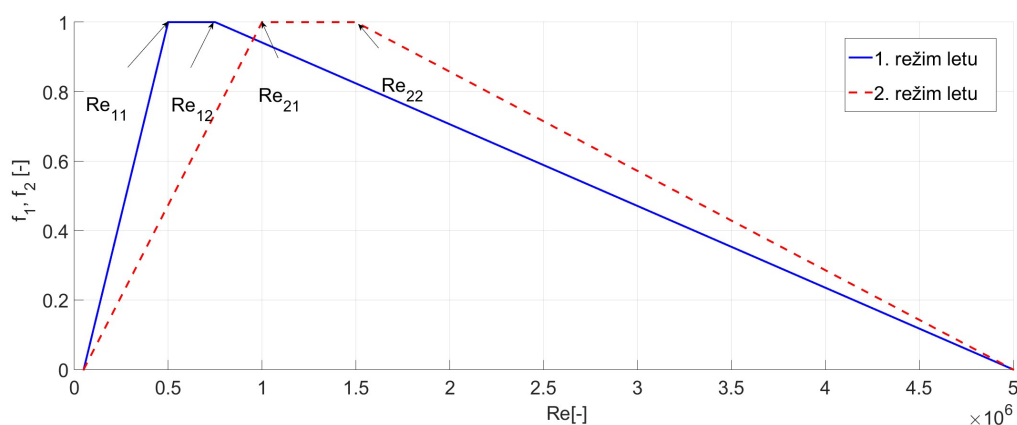
6.2 Multiparametrické vyhledávání

Vyhledávání v databázi s více parametry vyžaduje takové řešení, které je optimem všech požadavků kladených na profil. Zavádí se dva typy funkcí váhová a výběrová, které ovlivňují výsledné řešení. Správným nastavením obou funkcí je klíčové pro nalezení požadovaného profilu.

6.2.1 Váhová funkce

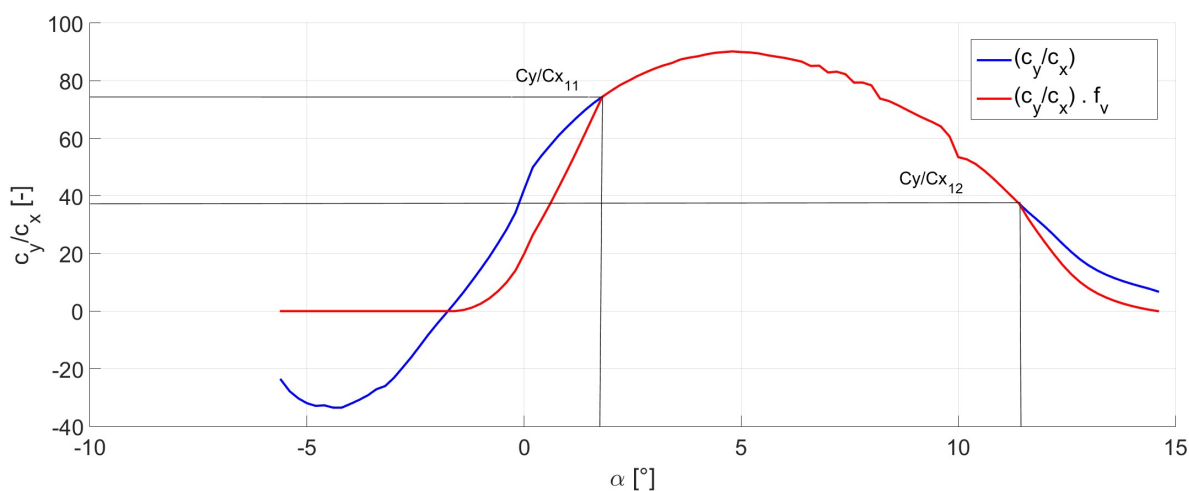
Váhovou funkcí je zajištěno zohlednění požadovaných parametrů v celé množině dat. Program pro multiparametrické vyhledávání byl podle zadání vytvořen pro dva režimy letu, které představují dva různé intervaly rychlostí, ve kterých se letadlo pohybuje. Požadavkem byla možnost nastavení rychlostí a optimálního vztlaku pro jednotlivé profily.

První dvojice váhových funkcí je určena intervaly Reynoldsových čísel (Re_{11} , Re_{12}) a (Re_{21} , Re_{22}). Váhovou funkcí na obr. 6.2 je vynásobena klouzavost profilu c_y/c_x pro jednotlivá Reynoldsova čísla.



Obr. 6.2 Váhové funkce pro Re čísla ve dvou režimech letu

Druhé dvě váhové funkce jsou určeny intervalem vztlaků (c_{y11} , c_{y12}) a (c_{y21} , c_{y22}), při kterém se letoun bude pohybovat. Nejprve pro dva zadané vztlaky c_y nalezneme příslušné úhly náběhu α , kterým je přiřazena hodnota 1. Pro porovnávání profilů jsou použity pouze úhly náběhu $\alpha > 0$. Následně je váhovou funkcí vynásobena klouzavost profilu c_y/c_x podle obrázku 6.3, kde je zobrazena závislost c_y/c_x na α .



Obr. 6.3 Křivka klouzavosti před a po aplikování váhové funkce

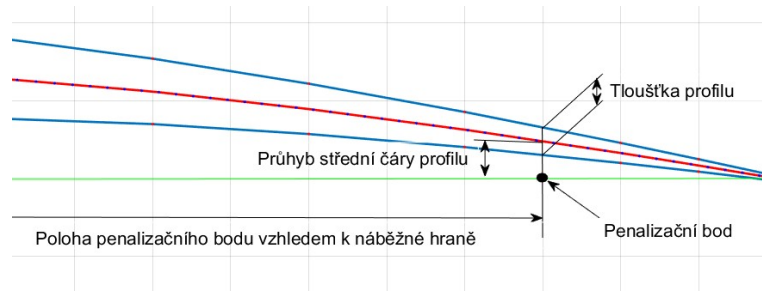
6.2.2 Výběrová funkce

Porovnání jednotlivých profilů je provedeno pomocí výběrové funkce, která obsahuje požadované vlastnosti profilu. Prvním druhem parametrů jsou aerodynamické koeficienty. Vynásobením maximálních vztlaků (16) a klouzavostí (17) pro jednotlivá Reynoldsova čísla váhovými funkcemi a vydělením počtem Reynoldsových čísel, je získán vážený průměr.

$$C_{y_{\max}} = \frac{\sum_{Re=1}^i (c_y)_{\max}(Re) \cdot f_{Re}(Re)}{i} \quad (16)$$

$$(C_y / C_x)_{\max} = \frac{\sum_{Re=1}^i (c_y / c_x)_{\max}(Re) \cdot f_{C_y}(Re) \cdot f_{Re}(Re)}{i} \quad (17)$$

Druhá skupina parametrů charakterizuje geometrické vlastnosti profilu, pomocí penalizačních koeficientů, které nabývají pouze hodnot 0 nebo 1. V tomto případě je penalizace v oblasti odtokové hrany, kde je zadána minimální tloušťka odtokové hrany a maximální průhyb střední čáry profilu. Zobrazení penalizačního bodu je na obrázku 6.4. Penalizace na odtokové hraně je zavedena z důvodů vyrobitelnosti profilu.



Obr. 6.4 Definice polohy penalizačního bodu

$$F_v = (C_{y_{\max 1}})^{k_1} + (C_{y_{\max 2}})^{k_2} + ((C_y / C_x)_{\max 1})^{k_3} + ((C_y / C_x)_{\max 2})^{k_4} + P_{camber} + P_{thickness} \quad (18)$$

$C_{y_{\max 1}}, C_{y_{\max 2}}$ = vážený průměr maximálního vztlaku profilu

$C_y / C_{x_{\max 1}}, C_y / C_{x_{\max 2}}$ = vážený průměr maximální klouzavosti profilu

P_{camber} = penalizační člen pro povolený průhyb střední čáry u odtokové hrany (0 nebo 1)

$P_{thickness}$ = penalizační koeficient pro minimální tloušťku u odtokové hrany (0 nebo 1)

k_1, k_2, k_3, k_4 = korekční koeficienty ovlivňující citlivost na jednotlivé parametry (0,1)

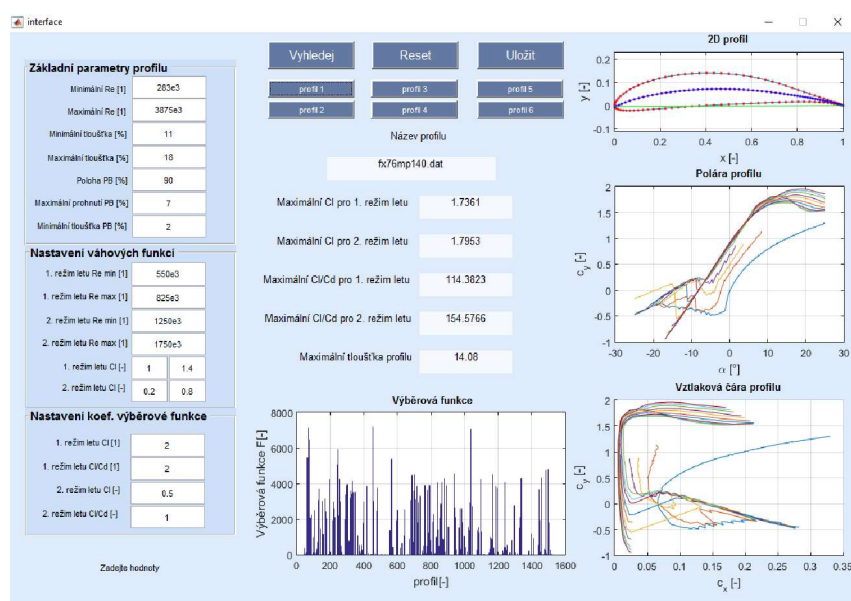
Poslední skupinou parametrů jsou korekční koeficienty, kterými jsou umocněny jednotlivé členy funkce. Pomáhají rozlišovat důležitost členů v rovnici a citlivost na jejich změnu. Pokud je potřeba zvýšit citlivost rovnice na zadaný člen, volí se $k > 1$ naopak pro zmenšení vlivu parametru je zadáno $k < 1$.

6.3 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní bylo vytvořeno v programu MATLAB, skládá se ze tří částí. První sekce obsahuje textová pole pro zadání požadovaných parametrů. Nejprve jsou zadány základní parametry. Následně je zadefinován rozsah Reynoldsových čísel, pro které bude profil počítán. Dále je zadána maximální a minimální tloušťka profilu. Pomocí omezení rozsahu tloušťky a Reynoldsových čísel je omezen celkový rozsah prohledávané databáze a tím je zrychleno vyhledávání. Dále je zadána poloha penalizačního bodu v procentech délky vzhledem k náběžné hraně. Po definování polohy penalizačního bodu je zadáno maximální dovolené prohnutí střední čáry a minimální přípustná tloušťka profilu. V druhé části zadávání vstupních hodnot jsou zadány parametry váhových funkcí pro Reynoldsova čísla a vztlak. Poslední se zadávají koeficienty výběrové funkce.

V druhé části jsou umístěna tlačítka pro ovládání celého programu. Vyhledávací tlačítko spustí funkci pro vyhledávání **Mpar.mat**, po dokončení vyhledávání je uloženo šest nejlepších profilů. Mezi profily můžeme přecházet pomocí tlačítek profil 1 - 6. Výstupy jsou zobrazeny v textové nebo grafické podobě. V tabulce hodnot jsou uvedeny výsledky pro krajní Reynoldsova čísla váhových funkcí. Dále je zde vykreslen průběh hodnotící funkce pro všechny profily v databázi.

V poslední části jsou zobrazeny grafické výstupy, kde první graf obsahuje samotný profil, střední čáru a tětivu. Druhým a třetím grafem jsou poláry a vztlakové čáry profilu pro Reynoldsova čísla (50 000 – 5 000 000). Po dokončení výpočtu a porovnání výsledků lze vybrané profily uložit do samostatného souboru. Pro nový výpočet je možné zadat a vypočtené hodnoty vymazat pomocí tlačítka reset nebo pouze upravit některé parametry.

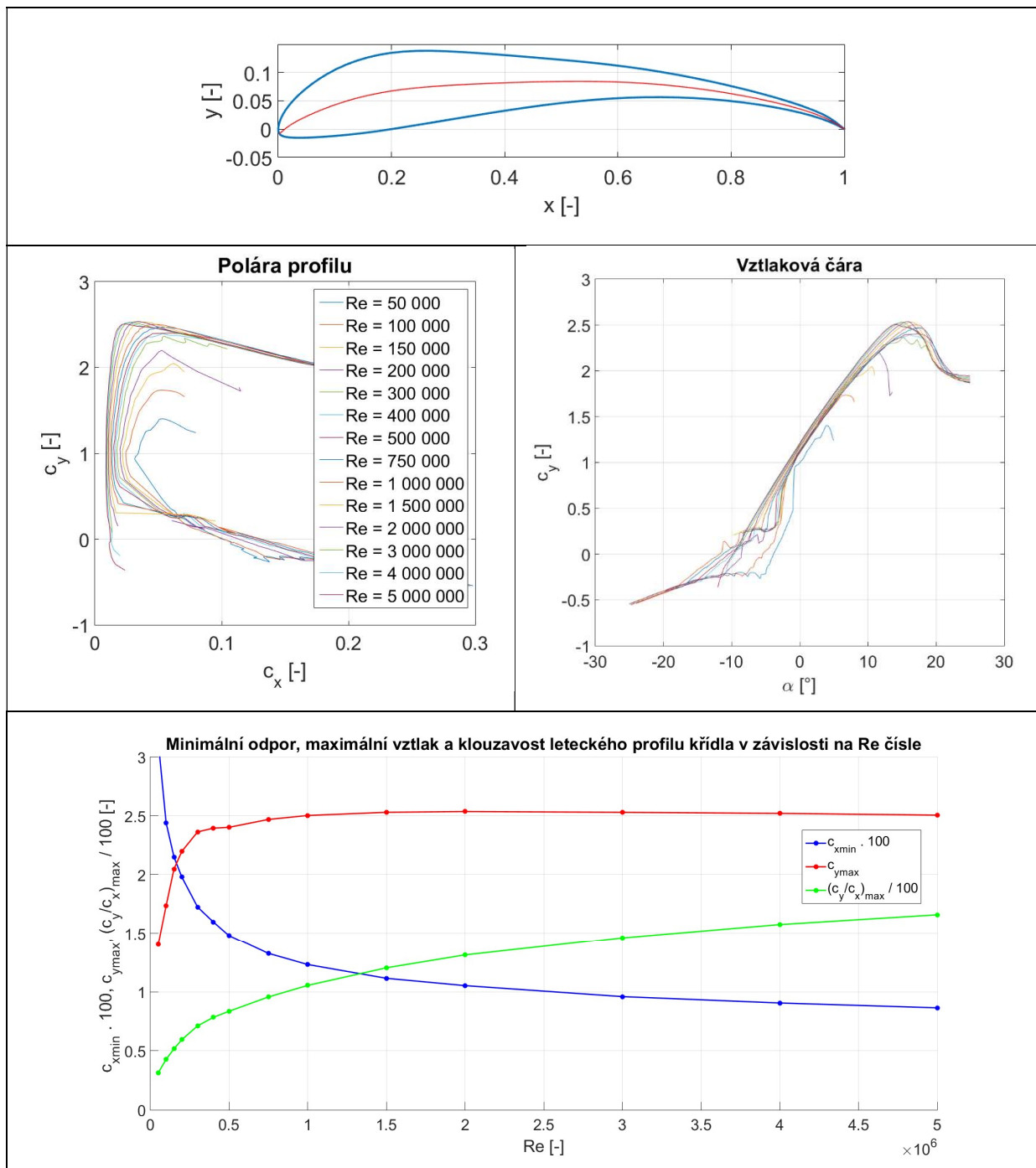


Obr. 6.5. Uživatelské rozhraní pro multiparametrické vyhledávání

6.4 Vyhodnocení výsledků vyhledávání

6.4.1 Profil s největším maximálním vztlakem

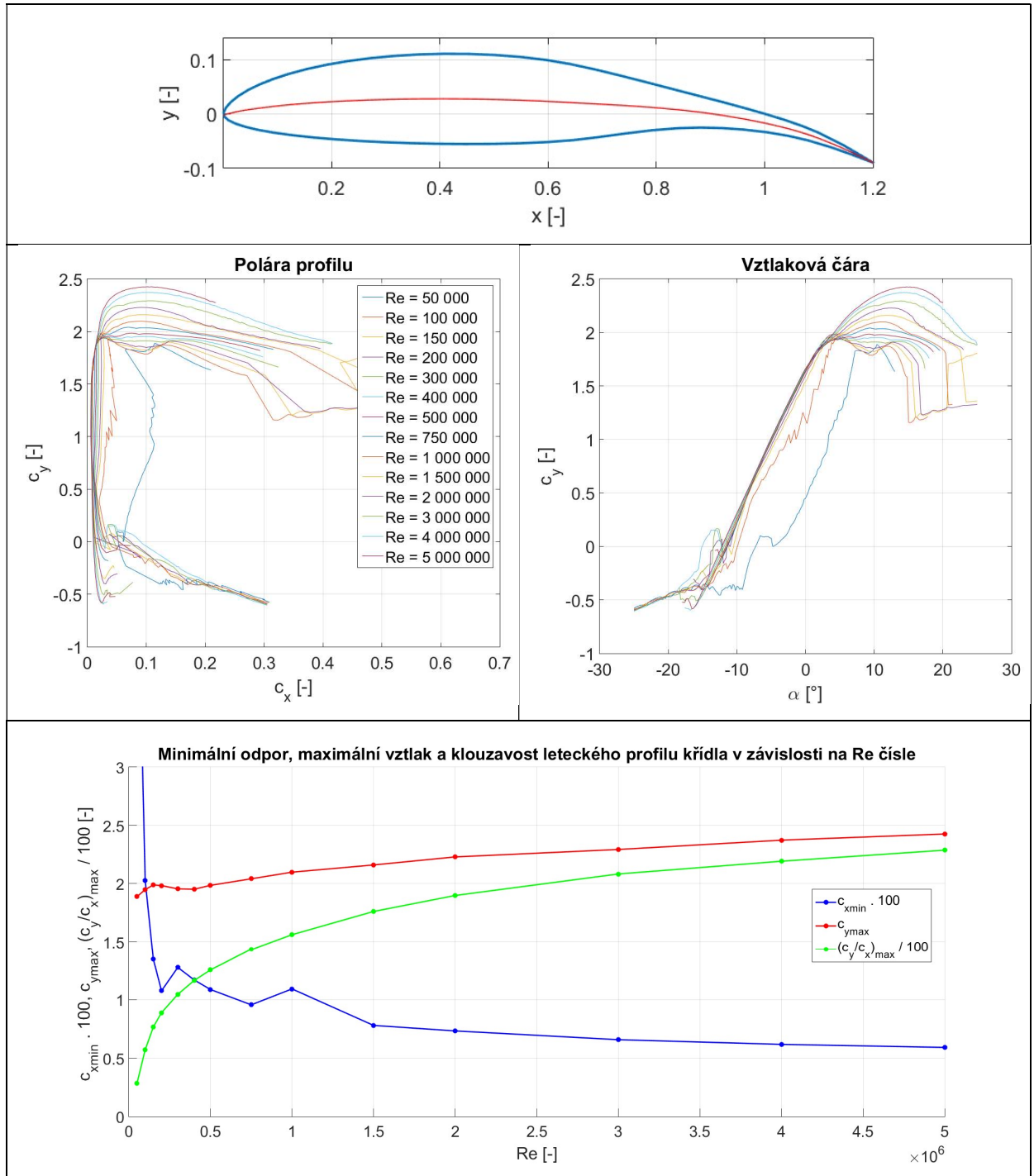
První nastavení vyhledávání profilu je s neomezenými geometrickými parametry. Nastavením koeficientů výběrové funkce k pro c_y na hodnotu $k > 1$ a k pro c_y/c_x na hodnotu $k < 1$, docílíme maximálního zvýhodnění $c_{y\max}$ vůči ostatním parametrům. Váhové funkce pro Reynoldsova čísla jsou v celém intervalu konstantní a rozsahy vztlaku jsou neomezené. Profil s největší maximální hodnotou vztlaku byl vybrán **S1223 RLT**.



Obr. 6.6 Vyhodnocení vyhledávání pro profil s vysokým $c_{y\max}$

6.4.2 Profil s největší maximální klouzavostí

Druhé nastavení programu je pro profil s nejvyšší maximální klouzavostí, kde jsou nastaveny hodnoty koeficientů váhové funkce k pro $c_x/c_y > 1$ a pro $c_y < 0$. Geometrické parametry nejsou omezeny. Nastavení váhových funkcí je v celém rozsahu Reynoldsových čísel konstantní a rozsah vztlaku je neomezený. Programem byl nalezen letecký profil: **eppler 664 (prodloužený)**.

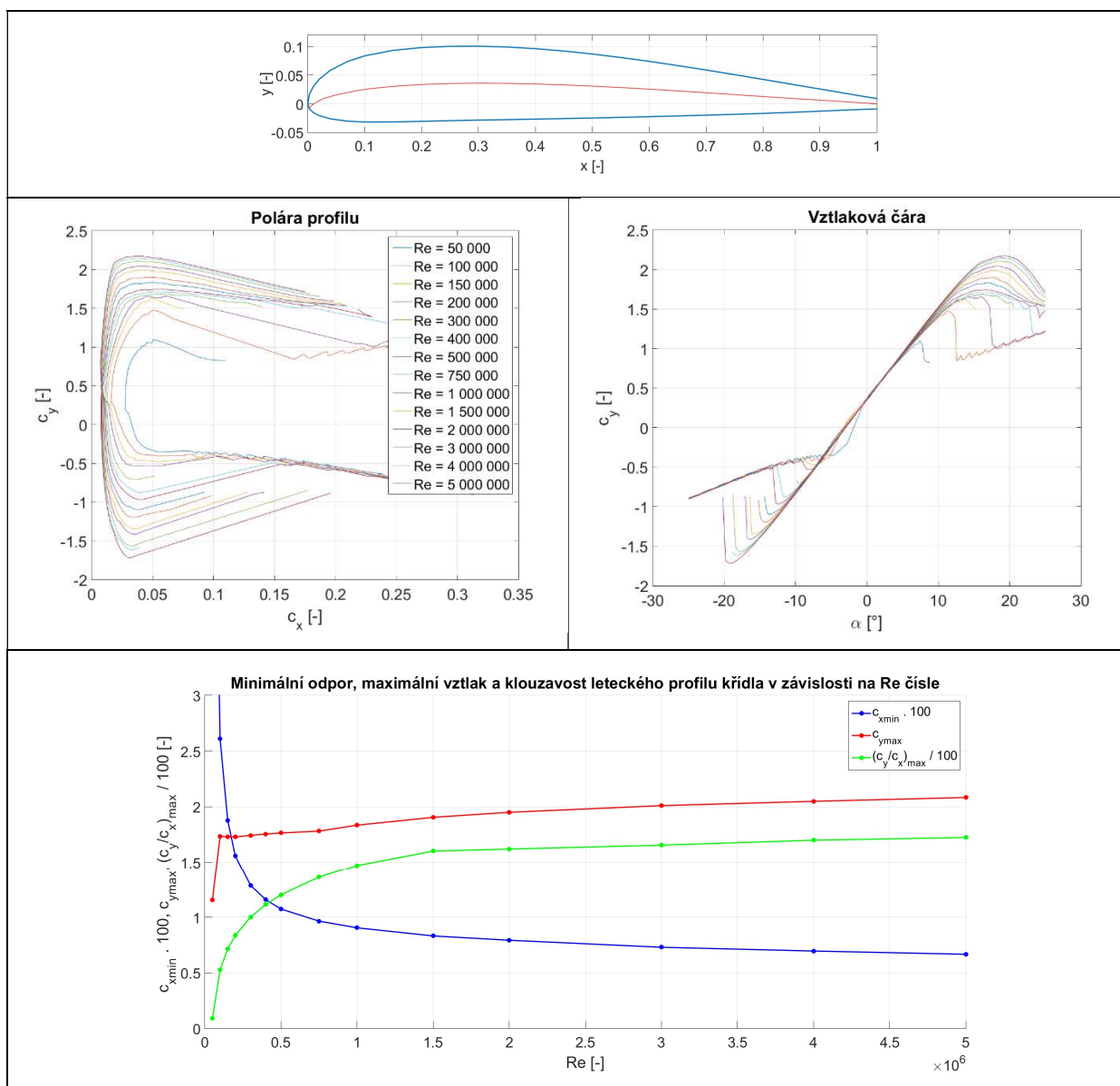


Obr. 6.7 Vyhodnocení vyhledávání pro profil s vysokým $(c_y/c_x)_{max}$

6.4.3 Profil s nastavením optimálních parametrů

Předchozí letecké profily vystupují z databáze svými vysokými aerodynamickými koeficienty. Z hlediska použití jsou velmi náročné na výrobu a vysokých aerodynamických koeficientů dosahují pouze pro určitá Reynoldsova čísla.

Při vyhledávání profilu pro reálný letoun se vychází z určitých rozsahů rychlostí, vztlaků a geometrických parametrů. Nejprve jsou pro daný profil vybrány rozsahy rychlostí (vzletová, cestovní, přistávací ...). Dále je nastaveno rozmezí tloušťky profilu, které ovlivňuje pevnostní vlastnosti a odpor profilu. Poslední je nastavení penalizace průhybu a tloušťky profilu na odtokové hraně. Výsledkem vyhledávání je profil **ARA-D 13%**, který je kompromisem mezi nízkým odporem, vysokou klouzavostí, vysokým vztlakem a vyrobiteľností profilu.



Obr. 6.8 Vyhodnocení vyhledávání pro reálný profil

7 Optimalizace profilu pomocí GA

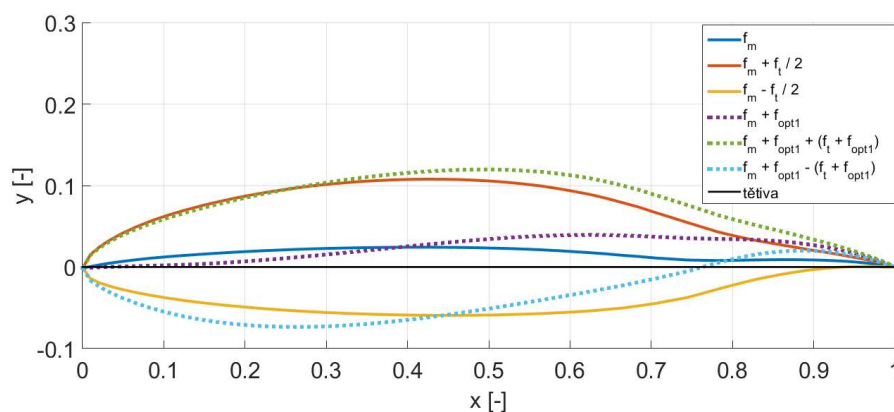
Na vyhledávání profilů navazuje optimalizační algoritmus, kterým je vyhledaný profil dále upraven. Pro optimalizaci byl vybrán genetický algoritmus, kterým je profil dále modifikován. Výhodou genetických algoritmů pro aplikaci v aerodynamické optimalizaci profilu je jednoduchá struktura a rychlost konvergence algoritmu k lepšímu řešení.

7.1 Nastavení optimalizačního algoritmu

Algoritmus je napsán v MATLABu a jednotlivé výpočty profilů probíhají v programu XFOIL. Spuštění celého algoritmu je ze skriptu **GA_star.mat**, který obsahuje základní nastavení celého algoritmu. Nejprve je načten profil z databáze a nastaven počet jedinců v populaci, kde optimální množství se pohybuje mezi 4 - 6. Dále jsou zadány parametry jako rozsah Reynoldsových čísel, pro které je profil optimalizován. Poslední částí jsou nastaveny parametry pro hodnotící funkci a podmínek pro ukončení algoritmu. Algoritmus je ukončen, pokud účelová funkce dosáhla požadované hodnoty, byl proveden maximální povolený počet iterací nebo po určitém počtu iterací funkce stagnuje.

První generace je vytvořena funkcí **GA_sgen.mat**. Optimalizace je založena na rozložení profilu na funkci průhybu střední čáry f_m a funkci tloušťky profilu f_t . Pro složení profilu do původních souřadnic jsou funkce sečteny. Horní část vznikne $f_m + f_t / 2$, kde tloušťková funkce je brána jako celková tloušťka profilu musí být rozdělena na dvě stejné části. Spodní část je vypočtena $f_m - f_t / 2$.

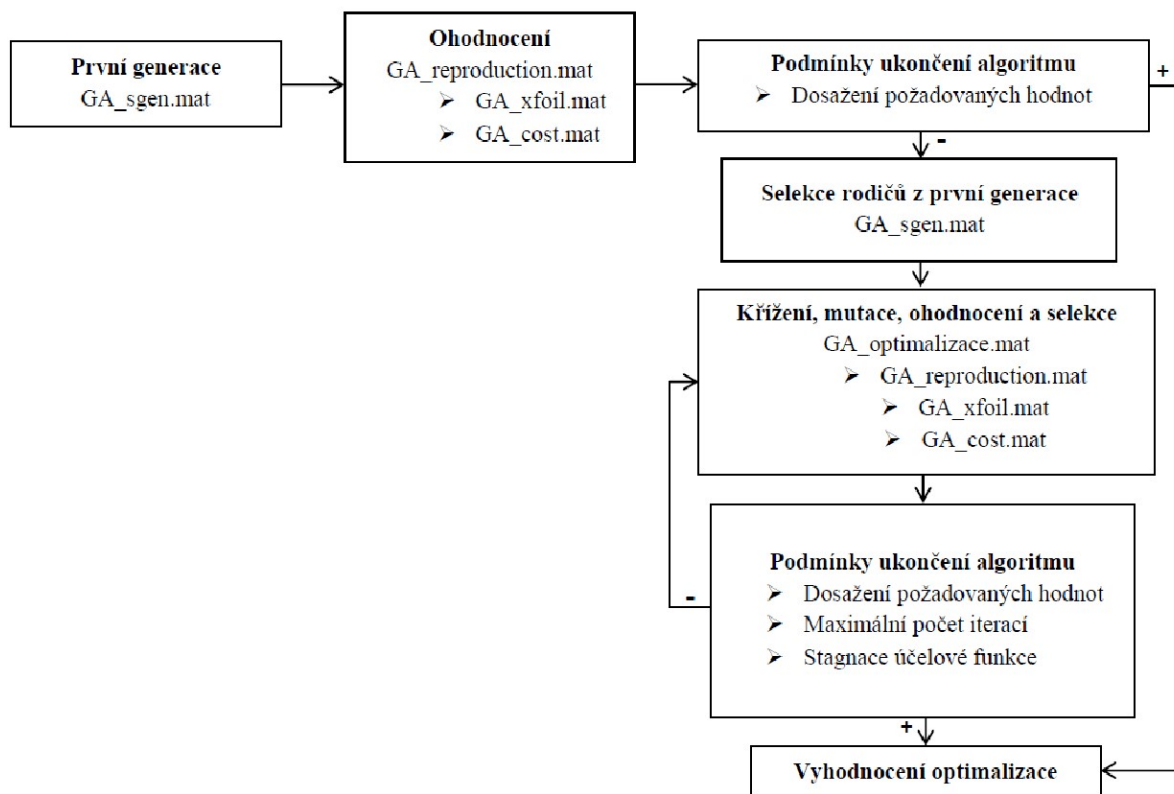
Optimalizace probíhá modifikací funkcí f_m a f_t pomocí přičtení optimalizovaných funkcí f_{opt1} a f_{opt2} . Optimalizační funkce jsou definovány dvěma okrajovými pevnými body a dvěma řídicími pohyblivými body uprostřed intervalu. Proložení bodů funkcí spline je získána výsledná optimalizační funkce. Výsledným spojením funkcí f_m s f_{opt1} , f_t s f_{opt2} je složený výsledný optimalizovaný profil. Výsledné složení profilu je představeno na obr. 7.1.



Obr. 7.1 Rozložení profilu na tloušťkovou a průhybovou funkci a jejich modifikace

Po náhodném vytvoření první generace profilů následuje výpočet aerodynamických koeficientů v programu XFOIL pomocí funkce **GA_xfoil.mat** vnořeného do funkce **GA_reproduction.mat**, obsahující funkci pro ohodnocení **GA_cost.mat**. Účelová funkce pro optimalizaci je shodná s výběrovou funkcí pro multiparametrické vyhledávání, pouze nezahrnuje penalizační koeficienty. Podle hodnot účelové funkce jsou vybráni rodiče pro následující generaci pomocí jednotkové přímkky.

Poslední částí je optimalizační funkce **GA_optimalizace.mat**, která provede křížení členů, kde matice řídících bodů funkcí f_{opt1} , f_{opt2} jsou zkříženy. Mutace je provedena vynásobením koeficientem mutace. Dalším krokem je opět výpočet aerodynamických koeficientů, ohodnocení účelovou funkcí a následná selekce rodičů pro další generaci. Základní schéma celého algoritmu je zobrazeno na obrázku 7.2.



Obr. 7.2 Schéma genetického algoritmu

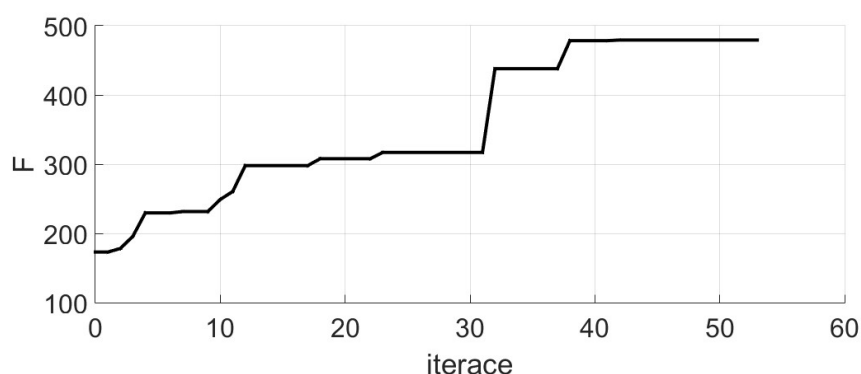
Po vytvoření generace vždy následuje vyhodnocení výsledků a porovnání s podmínkami pro ukončení algoritmu. Splněním podmínky je algoritmus zastaven a jsou vyhodnoceny výsledky optimalizace, pokud výsledky nejsou splněny, optimalizace pokračuje. Hlavními podmínky pro ukončení je dosažení požadované hodnoty účelové funkce, požadovaných parametrů, maximálního počtu iterací nebo dojde k delší stagnaci jedinců.

7.2 Výsledky optimalizace

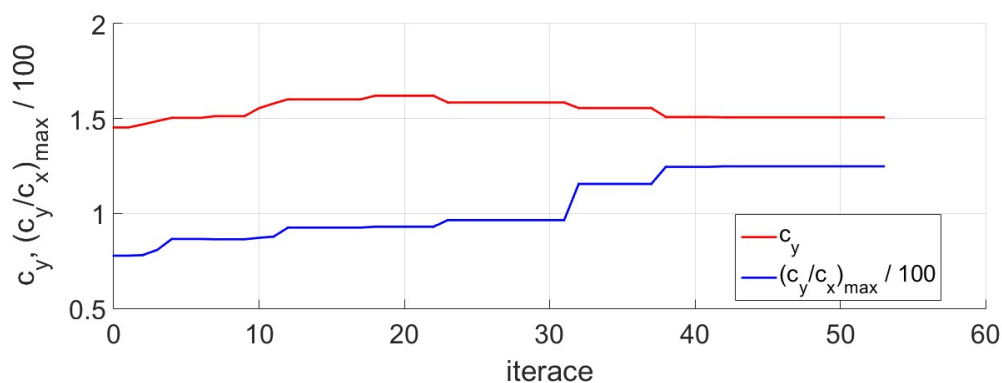
Pro představení optimalizačního algoritmu byl vybrán symetrický profil NACA 63012a. Optimalizace byla provedena pro Reynoldsovo číslo 1 500 000, které charakterizuje režim letu větroně. Nastavení účelové funkce bylo zaměřeno na nastavení větší citlivosti na změnu klouzavosti profilu, kde účelová funkce je podobná jako u multiparametrického vyhledávání (18).

$$f = (C_{y_{\max 1}})^{k_1} + (C_{y_{\max 2}})^{k_2} + ((C_y / C_x)_{\max 1})^{k_3} + ((C_y / C_x)_{\max 2})^{k_4} \quad (19)$$

Poslední částí byl nastaven počet jedinců v generaci $P = 5$ a podmínky ukončení algoritmu. Podmínky pro ukončení jsou nastaveny pouze maximální počet iterací a maximální počet iterací při stagnaci funkce. Na následujících obrázcích 7.1 – 7.2, lze vidět průběh účelové funkce v jednotlivých iteracích a vývoj maximálních hodnot aerodynamických koeficientů.

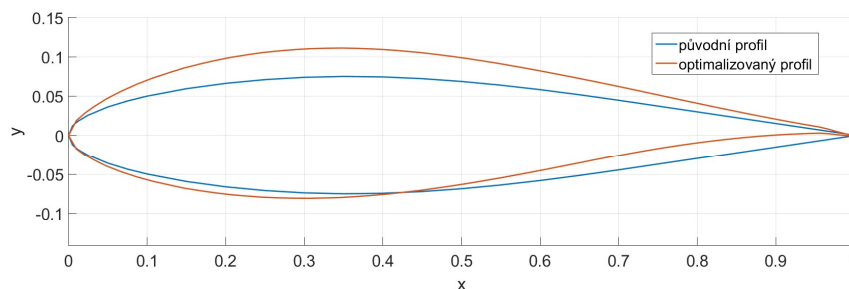


Obr. 7.3 Průběh účelové funkce v závislosti na iteracích optimalizace

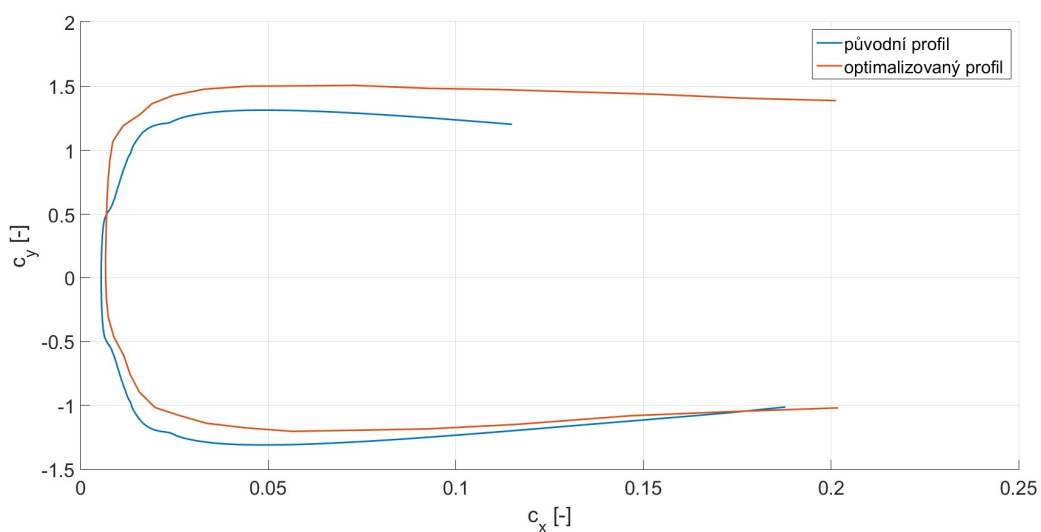


Obr. 7.4 Maximální aerodynamické koeficienty v závislosti na iteracích optimalizace

Porovnání výsledného a původního profilu je zobrazeno na obr.7.5, kde je vidět rozdíl optimalizovaného profilu ve větší tloušťce náběžné a střední části. Naopak u odtokové hrany došlo ke ztenčení a mírnému prohnutí.



Obr. 7.5 Porovnání původního a optimalizovaného profilu NACA 63012a



Obr. 7.6 Porovnání polár původního a optimalizovaného profilu NACA 63012a

Výsledné porovnání výsledků optimalizace je nejlépe čitelné z výsledných polár na obrázku 7.6, kde došlo k navýšení maximálního vztlaku z 1,453 na 1,506 a maximální klouzavosti profilu ze 77,74 na 124,8.

8 Závěr

Optimalizace a výběr vhodného leteckého profilu jsou dnes důležitými prvky návrhu letadla, kterými je docíleno zlepšení ovladatelnosti letadla, spotřeby a mnoha dalších parametrů.

V této práci jsou propojeny základní pojmy aerodynamiky a optimalizace. Dále jsou definovány základní aerodynamické a geometrické parametry leteckého profilu křídla, použité ve výsledné optimalizační a výběrové funkci. Na základě studia literatury byl analyzován dopad změny jednotlivých parametrů na výsledné chování letadla a stanoveny cíle optimalizace. Hlavní cíle pro požadovaný profil byly maximální hodnoty vztlaku, klouzavosti, limitní tloušťka a průhyb odtokové hrany leteckého profilu křídla. Následně jsou zde popsány jednotlivé optimalizační metody: Slepý algoritmus, Horolezecký algoritmus, Zakázané prohledávání. Simulované žíhání, Roj částic a Genetický algoritmus.

K určení optimálního profilu křídla byl vytvořen univerzální nástroj pro vyhledávání leteckých profilů křídel, který disponuje jejich rozsáhlou databází. Tento program byl vytvořen v prostředí MATLAB. Nejdříve byla vytvořena databáze profilů křídel. Za pomoci programu XFOIL, který ke svým výpočtům používá panelovou metodu, byly vypočteny vztlak, odpor a klopivý moment profilu křídla. Panelová metoda se vyznačuje rychlým výpočtem oproti ostatním technikám využívajícím síťové metody. Program vyhledávající v databázi nejvhodnější letecký profil pro požadované parametry je složen ze základního uživatelského rozhraní, které umožňuje zadání požadovaných parametrů a zobrazení grafických výsledků vyhledávání. Program je primárně určen pro modely letadel a menší letadla v rozmezí Reynoldsových čísel mezi 50 000 a 5 000 000. Pro zlepšování výsledků vyhledávání, je možné další rozšiřování databáze o nové profily, které lze nahrát pomocí přiložených skriptů.

Druhým výstupem je optimalizační algoritmus, který vyhledané profily dále modifikuje a zdokonaluje. Pro optimalizaci byl vybrán genetický algoritmus. Hlavním kritériem výběru algoritmu byla především rychlost konvergence algoritmu k optimálnímu řešení. Optimalizace byla provedena pomocí rozložení leteckého profilu křídla na tloušťkovou a průhybovou funkci, která se dále optimalizovala. Výsledky optimalizace dopadly podle očekávání, optimalizace profilu NACA 63012a navýšila maximální vztlak profilu z hodnoty 1,453 na 1,506 a maximální klouzavost ze 77,74 na 124,8. Pro další zlepšování výsledků a zrychlení je možné zavedení paralelizace výpočtů a zpřesnění okrajových podmínek.

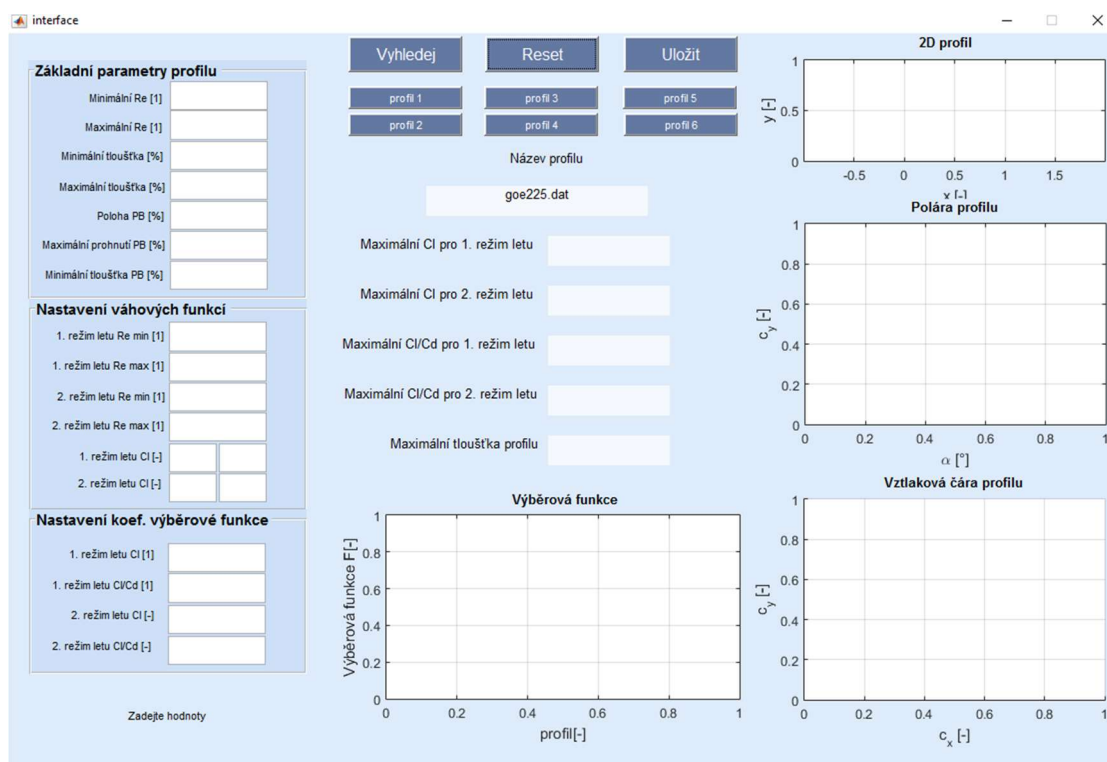
Literatura

- [1] MUSIL, Miroslav. *Aerodynamika moderních leteckých modelů*. Praha: Naše vojsko, 1978. Knižnice Svazarmu.
- [2] BROŽ, Václav. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. 3. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učenítěchnického, 1990, 182 s.
- [3] ZÁRYBNICKÝ, Vít a . *Aerodynamika: Aerodynamika podzvukových rychlostí*. Praha, 1999.
- [4] ZELINKA, Ivan. *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-218-3.
- [5] VOLNÁ, Eva. *Evoluční algoritmy a neuronové sítě*. Ostrava, 2012.
- [6] HYNEK, Josef. *Genetické algoritmy a genetické programování*. 1. vyd. Praha: Grada, 2008. Průvodce (Grada). ISBN 978-80-247-2695-3.
- [7] NOWICKI, Eugeniusz a Czesław SMUTNICKI. A fast tabu search algorithm for the permutation flow-shop problem. *European Journal of Operational Research*. 1996, **91**(1), 160-175. DOI: 10.1016/0377-2217(95)00037-2. ISSN 03772217. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0377221795000372>
- [8] VESELÝ, Filip. *APLIKACE OPTIMALIZAČNÍ METODY PSO V PODNIKATELSTVÍ: Optimalizace na bázi částicových hejn*. BRNO, 2010. Diplomová práce.
- [9] VEJVODA, Jiří. *IT Systems: Genetické algoritmy a jejich využití v řízení výroby - II. část* [online]. 2001, **3**(3) [cit. 2016-04-30]. ISSN 1802-615X. Dostupné z: <http://www.systemonline.cz/clanky/geneticke-algoritmy-a-jejich-vyuziti-v-rizeni-vyroby-ii-cast.htm>
- [10] DRELA, Mark. *XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils*. , 1. DOI: 10.1007/978-3-642-84010-4_1. Dostupné také z: http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-642-84010-4_1
- [11] DRELA, Mark. *User's Guide* [online]. 2001 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/xfoil_doc.txt
- [12] *O letadlech: Konstrukce Křídla* [online]. Uherské Hradiště: Dušan Slavětínský, 2010 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/Konstrukcekridla.aspx>

Příloha A

Návod k programu pro multiparametrické vyhledávání

Program lze nainstalovat do MATLABu v podobě aplikace z přiloženého souboru **Airfoil_search.mlappinstall** nebo spuštěn pomocí skriptu **interface.mat**. Pro spuštění a správnou funkci programu je potřeba ponechat nainstalovanou složku ve výchozím adresáři, z kterého byla aplikace nainstalována. Dále musí složka obsahovat databázi profilů **3_databaze_profilu_V2.mat**, která je využívána pro načítání dat profilů. Po spuštění se otevře okno, které je zobrazeno na následujícím obrázku.



Pro úspěšný výpočet profilů je nutné nejprve zadat požadované parametry do bílých polí v první části programu. Po zadání požadovaných hodnot může proběhnout výpočet. Průběh výpočtu je zobrazen v příkazovém řádku nebo ve spodním rohu, kde po úspěšném výpočtu je zobrazeno „Vyhledávání dokončeno“. Při selhání výpočtu je zobrazeno „V databázi nebyl nalezen vhodný profil“. Pokud jsou pole prázdná nebo byly resetovány hodnoty je zobrazen příkaz „Zadejte hodnoty“.

Vyhledávání profilů probíhá na základě vypočtených parametrů, které jsou pro různá Reynoldsova čísla interpolována. Seznam vypočtených Reynoldsových čísel, pro které byly vypočteny aerodynamické koeficienty: 50 000, 100 000, 150 000, 200 000, 300 000, 400 000, 500 000, 750 000, 1 000 000, 1 500 000, 2 000 000, 3 000 000, 4 000 000, 5 000 000. Zadaná Reynoldsova čísla se musí pohybovat v rozmezí hodnot 50 000 – 5 000 000

I. Základní parametry optimalizace

Základní parametry profilu	
Minimální Re [1]	70e3
Maximální Re [1]	3780e3
Minimální tloušťka [%]	12
Maximální tloušťka [%]	20
Poloha PB [%]	85
Maximální prohnutí PB [%]	8
Minimální tloušťka PB [%]	2

1. Nastavení spodní hranice intervalu Reynoldsových čísel, pro které je profil počítán.
2. Nastavení horní hranice intervalu Reynoldsových čísel, pro které je profil počítán.
Bod 1. i 2. jsou zadávány v rozmezí od 50 000 do 5 000 000.
3. Zadání minimální tloušťky profilu v procentech (databáze leteckých profilů obsahuje profily od 4% do 26%).
4. Zadání maximální tloušťky profilu v procentech
5. Poloha penalizačního bodu určuje vzdálenost bodu od náběžné hrany leteckého profilu křídla. Lze použít pro hledání symetrických profilů pro nastavení řezu pro 50%. Omezení tloušťky odtokové hrany je nastaveno v rozmezí 85-90%.
6. Nastavení maximální hodnoty prohnutí profilu v penalizačním bodě, zadáno procenty.
7. Nastavení minimální hodnoty tloušťky profilu v penalizačním bodě, zadáno procenty.

II. Nastavení váhových funkcí

Nastavení váhových funkcí			
1. režim letu Re min [1]	750e3		
1. režim letu Re max [1]	1250e3		
2. režim letu Re min [1]	1500e3		
2. režim letu Re max [1]	2200e3		
1. režim letu Cl [-]	0.8	1.2	
2. režim letu Cl [-]	1.4	1.8	

1. + 3. Zadáním je nastavena spodní hodnota váhové funkce profilu pro rozložení Reynoldsových čísel.
2. + 4. Zadáním je nastavena horní hodnota váhové funkce profilu pro rozložení Reynoldsových čísel. Funkce zvýhodňuje profily s lepšími parametry v rozmezí zadaných okrajových hodnot. Parametry jsou zadány v rozsahu vypočtených Reynoldsových čísel.
5. + 6. Nastavení požadovanému rozsahu vztlaaku, ve kterém se profil musí pohybovat.

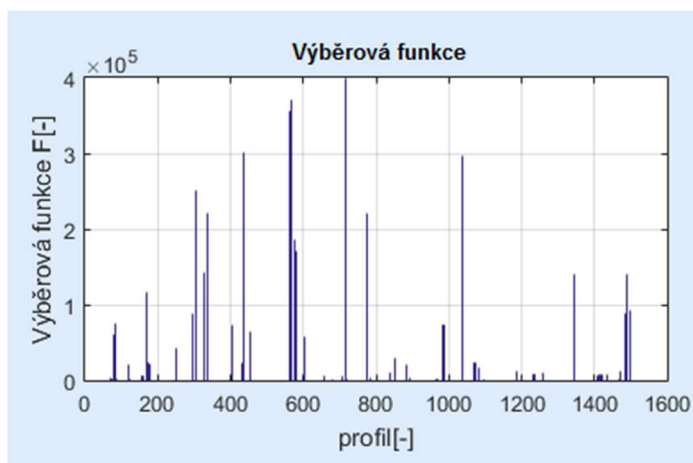
III. Nastavení koeficientů výběrové funkce

Nastavení koef. výběrové funkce	
1. režim letu CI [1]	1
1. režim letu CI/Cd [1]	2
2. režim letu CI [-]	1
2. režim letu CI/Cd [-]	2

Nastavením koeficientů výběrové je ovlivněna citlivost na změnu jednotlivých parametrů funkce. Pro zvýšení citlivosti na změnu parametru je koeficient > 1 , pro snížení citlivosti je koeficient < 1 .

IV. Výsledky výpočtu

Po dokončení výpočtu jsou jednotlivé profily seřazeny sestupně od nejlepšího profilu. Na grafu výběrové funkce můžeme vidět úspěšnost algoritmu, dosažených maximálních hodnot váhové funkce a počtu vyfiltrovaných profilů s hodnotou funkce rovnou nule.



Nejlepších 6 profilů je možné zobrazit pod tlačítky profil 1 – 6. Následně jsou zobrazeny výsledky pro požadovaný profil. Maximální hodnoty klouzavosti a vztlaku jsou uvedeny pro dolní hranice váhových funkcí Reynoldsových čísel. Následně profil můžeme dohledat podle názvu v samotné databázi nebo uložit výsledné profily do souboru *.mat se všemi geometrickými a aerodynamickými parametry.